



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA, S.C.

**DESARROLLO DE UN SISTEMA
MULTIETAPA PARA LA DEGRADACIÓN DE
TOLUENO EN AIRE CONTAMINADO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO
DE

**MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
CON LA ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA
AMBIENTAL**

PRESENTA

I.Q. KARLA VERÓNICA BOLAÑOS ROMERO

Querétaro, México.
Agosto 2023





CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Dr. Luis Antonio Ortiz Frade
Director de Posgrado
PICYT – CIDETEQ
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del comité tutorial de la alumna KARLA VERÓNICA BOLAÑOS ROMERO, una vez leída y revisada la Tesis “**DESARROLLO DE UN SISTEMA MULTIETAPA PARA LA DEGRADACIÓN DE TOLUENO EN AIRE CONTAMINADO**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Ciencia y Tecnología con especialidad en INGENIERIA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste, firmó la presente el 28 día del mes de septiembre del año 2023.

Dra. Rocío García Martínez

Dr. José Octavio Saucedo Lucero

Dr. Fabricio Espejel Ayala

Dr. Francisco Javier Rodríguez Valadez



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Dr. Luis Antonio Ortiz Frade
Director de Posgrado
PICYT – CIDETEQ
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado de Examen de la alumna KARLA VERÓNICA BOLAÑOS ROMERO, una vez leída y revisada la Tesis “**DESARROLLO DE UN SISTEMA MULTIETAPA PARA LA DEGRADACIÓN DE TOLUENO EN AIRE CONTAMINADO**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Ciencia y Tecnología con especialidad en INGENIERIA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste, firmó la presente el 26 día del mes de septiembre del año 2023.

Dr. José de Jesús Pérez Bueno
Presidente

Dra. Antonia Sandoval González
Secretaria

Dra. Rocío García Martínez
Vocal

Índice

Índice de tablas	3
Índice de figuras	5
Abreviaciones	8
Agradecimientos	9
RESUMEN	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Contaminación del aire en el mundo	14
2.1.1 Contaminación de aire en interiores	16
2.1.2 Partículas suspendidas	19
2.1.2.1 Clasificación de las partículas suspendidas	19
2.1.3 Compuestos Orgánicos Volátiles.....	21
2.1.4 BTEX.....	22
2.2 Normatividad relacionada con los contaminantes en el aire.....	28
2.2.1 Normatividad internacional	29
2.2.2 Normatividad nacional.....	33
2.3 Métodos de detección de contaminantes en el aire.....	37
2.3.1 Partículas suspendidas	38
2.3.2 Compuestos orgánicos volátiles.....	38
2.3.3 BTEX.....	39
2.4 Métodos de tratamiento de aire.....	40
2.4.1 Partículas suspendidas	41
2.4.2 Compuestos Orgánicos Volátiles.....	42
2.4.3 BTEX.....	43
3. ESTADO DEL ARTE	44
4. JUSTIFICACIÓN	52
5. HIPÓTESIS	53
6. OBJETIVOS	54
7. METODOLOGÍA	55
7.1. Desarrollo de los métodos analíticos para cuantificar los BTEX	56

7.2. Síntesis de los electrodos de $\text{TiO}_{2,\text{nt}} \text{Ti}$	56
7.3. Electrólisis en medio líquido empleando los electrodos de $\text{TiO}_{2,\text{nt}} \text{Ti}$	58
7.4. Modificación de los electrodos de $\text{TiO}_{2,\text{nt}} \text{Ti}$ con sales de hierro	59
7.5 Electrólisis en medio líquido empleando superficies de $\text{Fe}_x\text{O}_x\text{-TiO}_{2,\text{nt}} \text{Ti}$	60
7.6. Determinación de cargas por método gravimétrico.....	61
7.7. Determinación de áreas electroactivas.....	61
7.8. Sistema de adsorción por carbón activado (ACA) para la remoción de tolueno gaseoso	62
7.9. Sistema para el tratamiento electroquímico (TEQ) para la remoción de tolueno gaseoso	62
7.10. Sistema para el tratamiento fotolítico (TF) para la remoción de tolueno gaseoso... 64	
7.11. Sistema multietapa para la remoción de tolueno gaseoso.....	64
7.12. Preparación de tubos muestreadores.....	66
7.13. Pruebas de validación para el prototipo mejorado.....	66
8. RESULTADOS	69
8.1. Remoción de tolueno gaseoso por adsorción con carbón activado (ACA)	69
8.2. Caracterización de los electrodos de $\text{TiO}_{2,\text{nt}} \text{Ti}$	73
8.3. Electrólisis de tolueno empleando superficies de $\text{TiO}_{2,\text{nt}} \text{Ti}$	85
8.4. Caracterización de los electrodos modificados de $\text{Fe}_x\text{O}_x\text{-TiO}_{2,\text{nt}} \text{Ti}$	91
8.5. Electrólisis en medio líquido empleando electrodos modificados de $\text{Fe}_x\text{O}_x\text{-TiO}_{2,\text{nt}} \text{Ti}$	97
8.6 . Remoción de tolueno gaseoso empleando el tratamiento electroquímico (TEQ) con electrodos modificados	100
8.7. Validación y pruebas preliminares del prototipo mejorado.....	102
8.8. Remoción de tolueno gaseoso mediante el tratamiento fotolítico (TF).....	104
8.9. Remoción de tolueno gaseoso empleando un reactor multietapa: ACA+TEQ+TF. 106	
8. CONCLUSIONES	110
PERSPECTIVAS Y RECOMENDACIONES	111
9. REFERENCIAS	112
10. ANEXOS	124
Anexo 1. Método cromatográfico GC-BID	124
Anexo 2. Método cromatográfico GC-MS	124

Índice de tablas

Tabla 1. Principales procesos de formación de las partículas suspendidas según su tamaño (INE-SEMARNAT, 2006).....	20
Tabla 2. Efectos del benceno sobre la salud (ASTDR, 2007a, 2007b, 2010 y 2017).	26
Tabla 3. Efectos del tolueno y etilbenceno sobre la salud (ASTDR, 2007a, 2007b, 2010 y 2017).....	27
Tabla 4. Efectos del xileno sobre la salud (ASTDR, 2007a, 2007b, 2010 y 2017).....	28
Tabla 5. Índice de Calidad de Aire establecido por la EPA (Programas Internacionales). .	31
Tabla 5. Índice de Calidad de Aire establecido por la EPA (Programas Internacionales). <i>Continuación.</i>	32
Tabla 6. AQI establecido por la EPA (Programas Internacionales).	33
Tabla 7. Normas mexicanas que establecen los niveles máximos de emisión de partículas a la atmósfera para fuentes fijas (INE-SEMARNAT, 2006).....	34
Tabla 7. Normas mexicanas que establecen los niveles máximos de emisión de partículas a la atmósfera para fuentes móviles (INE-SEMARNAT, 2006).....	35
Tabla 8. Normas Oficiales Mexicanas de calidad del aire ambiente (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, 2017).	36
Tabla 9. Tecnologías de remoción de BTEX reportadas en la literatura.	44
Tabla 9. Tecnologías de remoción de BTEX reportadas en la literatura. <i>Continuación.</i>	45
Tabla 9. Tecnologías de remoción de BTEX reportadas en la literatura. <i>Continuación.</i>	46
Tabla 10. Sales de hierro empleadas y las respectivas mezclas para la modificación de $Fe_xO_x-TiO_{2,nt} Ti$	59
Tabla 11. Pruebas realizadas para la validación del prototipo mejorado (emisiones del material del reactor y electrodos, muestreo y remoción de tolueno en aire ambiente).	67
Tabla 11. Pruebas realizadas para la validación del prototipo mejorado (emisiones del material del reactor y electrodos, muestreo y remoción de tolueno en aire ambiente). <i>Continuación.</i>	68
Tabla 12. Señales reportadas en espectros Raman para la caracterización de nanomateriales de TiO_2	77
Tabla 13. Señales identificadas en los espectros Raman obtenidos para la configuración de anodizado $TiO_{2,nt} Ti//Ti$	78
Tabla 14. Señales identificadas en los espectros Raman obtenidos para la configuración de anodizado $TiO_{2,nt} Ti//A.I$	81

Tabla 15. Remoción de tolueno mediante electrólisis empleando Ti como material de cátodo.	86
Tabla 16. Remoción de tolueno mediante electrólisis empleando A.I. como material de cátodo.	86
Tabla 17. Superficies modificadas de $\text{Fe}_x\text{O}_x\text{-TiO}_{2,\text{nt}}$ Ti empleando el método de sonólisis.	91
Tabla 17. Superficies modificadas de $\text{Fe}_x\text{O}_x\text{-TiO}_{2,\text{nt}}$ Ti empleando el método de sonólisis. <i>Continuación.</i>	92
Tabla 18. Superficies modificadas de $\text{Fe}_x\text{O}_x\text{-TiO}_{2,\text{nt}}$ Ti empleando el método de inmersión.	93
Tabla 19. Resultados de áreas reales modificación por inmersión.....	95
Tabla 20. Resultados de áreas reales modificación por sonólisis.....	96
Tabla 21. Remoción de tolueno mediante electrólisis empleando electrodos modificados por sonólisis.	98
Tabla 22. Remoción de tolueno mediante electrólisis empleando electrodos modificados por inmersión.	99

Índice de figuras

Figura 1. Emisiones de contaminantes tóxicos por compuestos en la ZMVM (Inventario de Emisiones de Contaminantes y de Efecto Invernadero, 2012).....	12
Figura 2. Muertes atribuibles a la contaminación del aire (Daly & Cognuck, 2021).....	15
Figura 3. Mala calidad del aire en interiores (ALDES, s.f.).....	16
Figura 4. Comparación de material particulado (PM) (Environmental Protection Agency, 2023).....	19
Figura 5. Estructura y número CAS de los BTEX (Bolden <i>et al.</i> , 2015).....	23
Figura 6. Principio básico de PCO para la eliminación de COV (Shayegan <i>et al.</i> , 2018)..	48
Figura 7. Influencia del número de diferentes dopantes metálicos (% en peso) sobre la degradación de los COV por el fotocatalizador de TiO ₂ (Shayegan <i>et al.</i> , 2018).....	49
Figura 8. El nivel de energía esquemático del dopado con Fe (metal de transición) con TiO ₂ (Shayegan <i>et al.</i> , 2018).....	50
Figura 9. Metodología para desarrollar la degradación de BTEX a nivel laboratorio y piloto empleando un sistema híbrido.	55
Figura 10. Curva de calibración para la concentración de tolueno obtenida por CG-BID.	56
Figura 11. Sistema para anodizado de placas de Ti para la formación de TiO _{2,nt} considerando: una celda electroquímica (a), ánodo de Ti (b), cátodo de Ti o A.I. (c), parrilla de agitación magnética (d), fuente de poder (e).....	57
Figura 12. Sistema para la electro-oxidación de tolueno en medio acuoso a nivel laboratorio, considerando: una celda electroquímica (a), ánodo de Ti (b), cátodo de Ti o A.I. (c), parrilla de agitación magnética (d), fuente de poder (e), y multímetro (f).....	58
Figura 13. Esquematización de la modificación de los electrodos mediante sonólisis.	60
Figura 14. Esquema de la modificación de electrodos de TiO _{2,nt} mediante inmersión.	60
Figura 15. Sistema para la adsorción con carbón activado (ACA, A) a distintas longitudes (6, 9, 12 y 15cm), para el tratamiento electroquímico (TEQ, B).....	63
Figura 16. Sistema el tratamiento fotolítico (TF, A), y multietapa considerando el ACA+TEQ+TF (B).	65
Figura 17. Esquema del interior del tubo empacado con TENAX, en el cual se considera: A) Resorte tipo Warren, B) Tapón de fibra de vidrio y C) Polímero TENAX.....	66
Figura 18. Sistema por ACA para la remoción de tolueno gaseoso: A) Parrilla de calefacción, B) Solución problema, C) Columna de carbón activado, D) Vaso de recolección y E) Bomba peristáltica.....	69
Figura 19. Monitoreo de la concentración de tolueno respecto al tiempo en el proceso de ACA a diferentes longitudes del reactor, C _i =100 ppm.....	70

Figura 20. Relación entre la concentración inicial y la concentración final de tolueno en función del tiempo empleando distintas longitudes de columna.....	71
Figura 21. Espectro Raman del carbón activado empleado en el reactor ACA, en donde: D) banda D, I) Inserción del tolueno, G) banda G.....	72
Figura 22. Área integrada (A_{δ_s}) referida a la deformación asimétrica de grupos C-CH ₃ / banda G del carbono grafitico respecto a la longitud de la columna (cm).	73
Figura 23. Tamaño del cristalito (nm) de acuerdo con la longitud de cada columna (cm). 73	
Figura 24. Esquema de los procesos que ocurren durante la anodización de Ti en presencia de electrolitos de flúor (A) para la posterior formación de los nanotubos de TiO _{2,nt} (B) (Regonini <i>et al.</i> , 2013).....	74
Figura 25. Imágenes SEM correspondientes al electrodo de TiO _{2,nt} Ti (t=15 min, E= 30 V, cátodo: A.I.).....	75
Figura 26. Espectro EDS del electrodo de TiO _{2,nt} Ti (t=15 min, E= 30 V, cátodo: A.I.)... 76	
Figura 27. Espectros Raman de los electrodos de TiO _{2,nt} Ti anodizados a distintos potenciales (10, 20, 30, 40 y 50 V), durante 15 min, con agitación a 200 rpm, utilizando como cátodo Ti (placa) y sinterizado a 600 °C, en donde se presenta la fase anatasa (*), rutilo (+) y brookita (°).....	79
Figura 28. Espectros Raman de los electrodos anodizados a: 10 (A), 20 (B), 30 (C), 40 (D) y 50 (E) V antes de ser utilizados en electrólisis (A.E.) y después de la electrólisis (D.E.) en la configuración TiO _{2,nt} Ti Ti, en donde se presenta la fase anatasa (*), rutilo (+) y brookita (°).....	80
Figura 29. Espectros Raman de los electrodos de TiO _{2,nt} Ti anodizados a distintos potenciales (10, 20, 30, 40 y 50 V), durante 15 min, con agitación a 200 rpm, utilizando como cátodo de acero inoxidable (placa) y sinterizado a 600 °C, en donde se presenta la fase anatasa (*), rutilo (+) y brookita (°).	82
Figura 30. Espectros Raman de los electrodos anodizados a 10 (A), 20 (B), 30 (C), 40 (D) y 50 (E) V antes de ser utilizados en electrólisis (A.E.) y después de la electrólisis (D.E.) en la configuración TiO _{2,nt} Ti A.I., en donde se presenta la fase anatasa (*), rutilo (+) y brookita (°).....	83
Figura 31. Análisis XRD correspondientes al electrodo de TiO _{2,nt} Ti (t=15 min, E=10, 20, 30, 40 y 50 V, cátodo= A.I.).....	84
Figura 32. Relación entre la remoción de tolueno (η) y la intensidad Raman (u.a.) de la fase anatasa identificada en el sistema TiO _{2,nt} Ti Ti (A, 665 cm ⁻¹) y TiO _{2,nt} Ti A.I. (B, 208 cm ⁻¹) al aplicar los diferentes potenciales interfaciales para la síntesis de cada electrodo de TiO _{2,nt} Ti.	88
Figura 33. Relación entre la intensidad de fase rutilo (IR) y la intensidad de fase anatasa (IA) para el sistema TiO _{2,nt} Ti Ti (A) y TiO _{2,nt} Ti A.I. (B) empleados para la remoción de tolueno a los 12 min de electrólisis respecto a la eficiencia de remoción (η) empleando cada electrodo de TiO _{2,nt} Ti sintetizado a los diferentes potenciales interfaciales aplicados.	90

Figura 34. Gráfico de obtención de cargas por el método gravimétrico correspondiente a la modificación por la metodología de sonólisis.	94
Figura 35. Gráfico de obtención de cargas por el método gravimétrico reportado con la modificación por la metodología de inmersión.	95
Figura 36. Gráfico áreas electroactivas obtenidas en los electrodos modificados por el método de inmersión.	96
Figura 37. Gráfico áreas electroactivas obtenidas en electrodos modificados por sonólisis.	97
Figura 38. Disposición de los electrodos cilindros de A.I. (cátodo) y $\text{TiO}_{2,\text{nt}} \text{Ti}$ (ánodo) para el sistema TEQ.	100
Figura 39. Sistema TEQ para la remoción de tolueno gaseoso: A) Parrilla de calefacción, B) Solución problema, C) Reactor electroquímico, D) Vaso de recolección, E) Bomba peristáltica y F) Fuente de poder	101
Figura 40. Cambio en la concentración de tolueno empleando el reactor electroquímico en presencia del ánodo de $\text{TiO}_{2,\text{nt}} \text{Ti}$ y cátodo de malla de acero inoxidable.	102
Figura 41. Configuración para las pruebas con muestra real del prototipo mejorado.....	103
Figura 42. Cromatograma de las emisiones del reactor (P1).....	103
Figura 43. Señales del cromatograma correspondientes al tolueno, con (ON) y sin (OFF) aplicar potencial.....	104
Figura 44. Sistema TF para la remoción de tolueno gaseoso: A) Parrilla de calefacción, B) Solución problema, C) Reactor fotolítico, D) Vaso de recolección y E) Bomba peristáltica.	105
Figura 45. Cambio en la concentración de tolueno empleando el reactor fotolítico con una lámpara UV de 365 nm.....	106
Figura 46. Sistema multietapa (ACA+TEQ+TF) para la remoción de tolueno gaseoso: A) Parrilla de calefacción, B) Solución problema, C) Reactor de adsorción por carbón activado, D) Reactor electroquímico, E) Reactor fotolítico, F) Vaso de recolección, G) Bomba peristáltica y H) Fuente de poder.....	107
Figura 47. Comparación de eficiencias de remoción de tolueno gaseoso empleando los procesos individuales de adsorción por carbón activado (ACA), tratamiento electroquímico (TEQ) y tratamiento fotolítico, así como el sistema multietapa implicando los tres procesos en conjunto (ACA+TEQ+TF), $t = 60$ min, volumen de muestra= 200 mL.	108
Figura 48. Ruta de degradación propuesta para tolueno empleando el sistema multietapa.	109

Abreviaciones

ABREVIACIÓN	SIGNIFICADO
A.I.	Acero Inoxidable
ACA	Adsorción con Carbón Activado
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i> (Autobuses de Tránsito Rápido)
BTEX	Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
CRE	<i>Carcinogenic Risk Estimation</i> (Estimación de Riesgo Carcinogénico)
D	Dopantes metálicos
GC-BID	<i>Gas Chromatography – Barrier Discharge Ionization Detector</i>
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i> (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer)
LCR	<i>Lifetime Cancer Risk</i>
LFO	LaFeO ₃
rGO	Grafeno reducido
TEQ	Tratamiento Electroquímico
TF	Tratamiento fotolítico
TiO _{2,nt}	Nanotubos de dióxido de titanio
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos)

Agradecimientos

- Al M.C. José Manuel Hernández Solís del Grupo de Fisicoquímica de la Atmósfera, por su apoyo en la evaluación y análisis del prototipo diseñado para la remoción del BTEX.
- Al Dr. Juan Manríquez Rocha por su apoyo en la obtención de los espectros Raman de los electrodos evaluados y del carbón activado utilizado en el presente proyecto.
- Al Dr. Goldie Oza por su disponibilidad para utilizar el equipo de cromatografía de gases modelo Nexus GC-2030.
- Al Dr. Joaquín Rodríguez López por su apoyo y asesoramiento para realizar la estancia en la Universidad de Illinois Camus Urbana-Champaign.
- Al estudiante de doctorado Aravind Baby del grupo del trabajo JRL de la UIUC por su apoyo en la obtención de los análisis SEM y XRD.
- A la Dra. Antonia Sandoval Gonzáles por su asesoramiento en la metodología de anodizado.
- A los I.Q.I Paulina Hernández Sosaya y Edgar Alonso Cruz por su contribución al proyecto durante sus residencias profesionales.
- Al comité evaluador por sus valiosas observaciones en el presente proyecto.
- **Especialmente a la Dra. Erika Bustos Bustos, asesora del presente trabajo, por su gran guía y apoyo en cada una de las actividades realizadas.**

RESUMEN

Debido a la complejidad de los BTEX, sus distintas capacidades de adsorción y potencial redox, dentro de estos, el tolueno es el contaminante con mayor presencia en la Zona Metropolitana del Valle de México. Uno de los principales desafíos del presente proyecto fue la modificación de materiales y selección de procesos para obtener altas eficiencias de remoción de tolueno en medio acuoso, y posteriormente en fase gaseosa. Por tal motivo, en esta tesis se propuso investigar la posibilidad de producir un sistema multietapa de purificación del aire que combine diferentes procesos físico-químicos: adsorción con carbón activado (ACA), tratamiento electroquímico (TEQ) y tratamiento fotolítico (TF).

Por tal motivo, en este estudio se evaluaron tres reactores distintos para la remoción de tolueno en fase gaseosa: reactor de adsorción con carbón activado, reactor para tratamiento electroquímico empleando electrodos de $\text{TiO}_{2,\text{nt}}|\text{Ti}$, y tratamiento fotolítico. Inicialmente, se evaluó la eficiencia de cada reactor de manera individual para la remoción de tolueno en fase gaseosa, posteriormente, se acopló un sistema multietapa para evaluar su eficiencia en conjunto (ACA+TEQ+TF), observando que el sistema multietapa fue más eficiente (99.58 %) que los individuales (ACA = 50.29 %, TEQ = 44.38 % y TF = 52.71 %), lo cual genera una nueva propuesta para el tratamiento de aire contaminado con tolueno en exteriores y/o interiores.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es un gran riesgo medioambiental que repercute considerablemente en la salud. En 2012 se produjeron 3.7 millones de muertes a causa de la contaminación atmosférica exterior de fuentes urbanas y rurales en todo el mundo, y en 2016 la contaminación atmosférica provoca 4.2 millones de defunciones prematuras anualmente de acuerdo con estimaciones de la OMS; el 91% de estas defunciones son en países de bajos a medianos ingresos; Asia Sudoriental y el Pacífico Occidental registran las mayores tasas de morbilidad. La disminución de los niveles de contaminación del aire puede reducir la morbilidad derivada de accidentes cerebrovasculares, cáncer de pulmón, neumopatías crónicas y agudas. Para 2019, se estimó que el 99% de la población mundial desarrollaba sus actividades diarias en lugares en los cuales no se respetaban las directrices de la OMS con respecto a la calidad del aire (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, 2017; OMS, 2021).

Dentro de los COV, el grupo de BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno) es considerado con alta toxicidad, algunos de ellos son considerados potencialmente carcinogénicos. Además, estos compuestos en el aire exterior tienen una gran variedad de fuentes de emisión, móviles (del tráfico vehicular), biogénicas, producto de emisiones evaporativas en tanques de almacenamiento de gas y gasolinas, de emisión directa en procesos de combustión, en procesos industriales, en fabricación y uso de solventes, entre otros.

Cabe mencionar, que los BTEX ocupan el quinto lugar en mortalidad prematura en el mundo, dado que se absorben rápidamente en los pulmones y se dispersan por todo el organismo, depositándose en mayor cantidad en los tejidos lipídicos (Garg & Gupta, 2019; Zhao *et al.*, 2019; Glencross *et al.*, 2020). Es de importancia destacar que las concentraciones de BTEX están influenciadas por la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad relativa (Sharma *et al.*, 2020; Syamimi *et al.*, 2022; Abbasi *et al.*, 2020). De acuerdo con el inventario de contaminantes tóxicos en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) del año 2012, se evaluaron 187 sustancias tóxicas, en el cual se determinó que la emisión más abundante fue la de tolueno, con un aporte de 49,233 toneladas por año, significando un 25% de las emisiones totales de contaminantes tóxicos (Figura 1) (Mancera *et al.*, 2012).

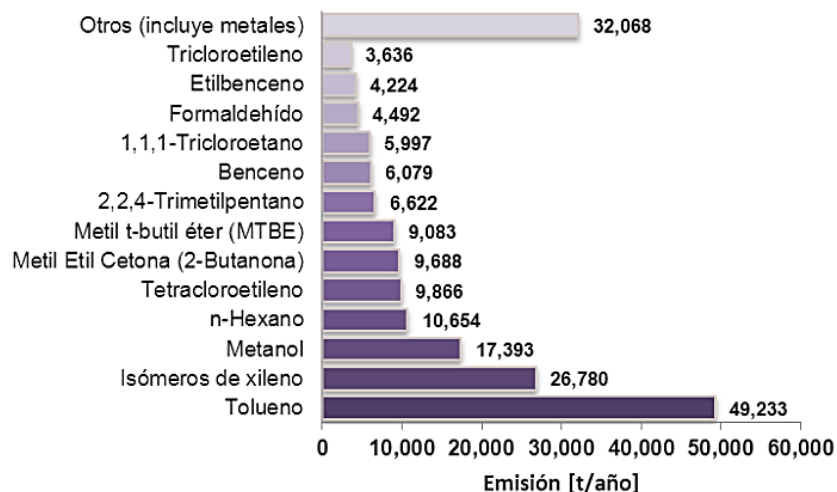


Figura 1. Emisiones de contaminantes tóxicos por compuestos en la ZMVM (Inventario de Emisiones de Contaminantes y de Efecto Invernadero, 2012).

A pesar de la implementación del programa “Hoy no circula” no ha demostrado efectos significativos en la disminución de los niveles de BTEX, ya que gran parte de la proporción de BTEX proviene de los depósitos de gasolina, además de la generación en los procesos de carga y descarga de combustible; desde 1986 la composición de la gasolina en México ha sufrido cambios, ya que se inició la reducción de plomo, por lo que se tuvieron que incrementar otros componentes para mejorar el octanaje, como butano y benceno, tolueno y xileno. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, es imperativo la evaluación e implementación de tecnologías para la remoción de estos contaminantes, tal como la propuesta del presente proyecto (Estéves *et al.*, 2015; Zarate *et al.*, 2015)

Han sido reportados distintos estudios sobre la degradación de tolueno por microorganismos (Espinoza *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020), fotocatalisis (Abidi *et al.*, 2020; Bellé *et al.*, 2022), degradación fotoelectroquímica (Zhu *et al.*, 2018) y fotoelectrocatalisis (Lin *et al.*, 2020), entre otros. Se requiere de materiales anódicos eficientes y estables para la oxidación electroquímica de contaminantes como el tolueno. Entre estos, uno de los materiales comúnmente empleados es el dióxido de titanio (TiO_2), el cual se considera un material con alto rendimiento, estable, no tóxico, económico y abundante. No obstante, cuando el TiO_2 está en forma de polvo, no se puede recuperar para su reutilización. Esto ha propiciado la búsqueda de otras formas para emplear el TiO_2 , entre estas se encuentran los nanotubos de

TiO₂ (TiO_{2,nt}), presentando grandes ventajas sobre el TiO₂ en polvo. Existen diversos métodos para obtener nanotubos de TiO₂, el más común es la anodización electroquímica de láminas de titanio (Ti) por ser un método sencillo, directo y económico; los nanotubos deben presentar una dirección vertical, dispuestos sobre el sustrato de Ti, lo cual permite la difusión directa en su superficie, por lo que es posible controlar el espesor, diámetro y longitud; también presentan una gran área superficial y mayor capacidad de adsorción, y pueden ser reutilizados (Lai *et al.*, 2019; Gonzáles *et al.*, 2019). La actividad fotocatalítica de TiO_{2,nt} se debe a la formación de pares electrón-hueco, que dan lugar a la generación de radicales altamente reactivos, que se utilizan para la descomposición de contaminantes, ya sea en fase líquida o gaseosa. En los TiO_{2,nt} cuanto mayor es el área de superficie de contacto (dentro y fuera de sus paredes), más pares de electrón-hueco y mayor es la degradación del contaminante, sobre todo cuando se adicionan otros catalizadores como el Fe₂O₃ (Mei *et al.*, 2019; Peng *et al.*, 2016; Sopha *et al.*, 2022).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Contaminación del aire en el mundo

La contaminación del aire está definida como la no depuración de la atmósfera debido a la inyección y permanencia temporal en ella de sustancias principalmente gaseosas, así como líquidas y sólidas, que no corresponde a su composición normal o a proporciones significativamente superiores a estas últimas. La clasificación de contaminantes se realiza de acuerdo a la naturaleza del contaminante, la fuente y el estado de agregación (Innovation and Qualification and Target Advisors, 1979; Puigcerver & Carrascal, 2008):

- 1) Naturaleza del contaminante: física (vibración, ruido, variaciones de temperatura, radiación,), química (inorgánica y orgánica) y biológica (polen, insectos pequeños, ácaros).
- 2) Fuentes: primarias (son emitidos directamente a la atmósfera) y secundarias (son formados como resultado de transformaciones o producto de reacciones de los contaminantes primarios en la atmósfera).
- 3) Estado de agregación: homogéneo (vapores y gases, son contaminantes que están presentes en la misma fase que el aire) y heterogéneos (se refiere a sólidos, líquidos, y sólidos-aerosoles líquidos, contaminantes presentes en un estado de agregación distinto al del aire).

La contaminación atmosférica es uno de los principales problemas para la salud pública y al medio ambiente que aqueja a países desarrollados, así como a países en vías de desarrollo alrededor del mundo. Los diversos contaminantes del aire se pueden agrupar en dos categorías principales (Matus & Rodrigo, 2002):

- a) Contaminantes primarios: los cuales se emiten directamente a la atmósfera.
- b) Contaminantes secundarios: estos se forman en la atmósfera a partir de contaminantes primarios a partir de distintas reacciones químicas tales como la hidrólisis, oxidación y reacciones fotoquímicas.

En la mayor parte de las ciudades del mundo que monitorean sus niveles de contaminación atmosférica, la calidad del aire no cumple con los niveles de seguridad señalados de acuerdo

con lineamientos de la OMS, esto representa un gran riesgo para la salud pública, que se traduce en enfermedades respiratorias y otros problemas de salud a largo plazo. Aproximadamente el 50% de la población urbana que es siendo monitoreada se encuentra expuesta a una contaminación atmosférica por lo menos 2.5 veces más alta de los niveles que recomienda la OMS; de acuerdo a estimaciones cerca del 95% de la población en países de bajo a mediano ingreso en América está expuesta a una contaminación atmosférica que excede los niveles recomendados, la cifra disminuye al 60% en los países de alto ingreso (INECC, 2015).

La Figura 2 representa la cantidad de muertes que se atribuyen a la contaminación del aire alrededor del mundo en 2016, partiendo de menos de 5 mil y llegando a 150 mil muertes al año (Daly & Cognuck, 2021).

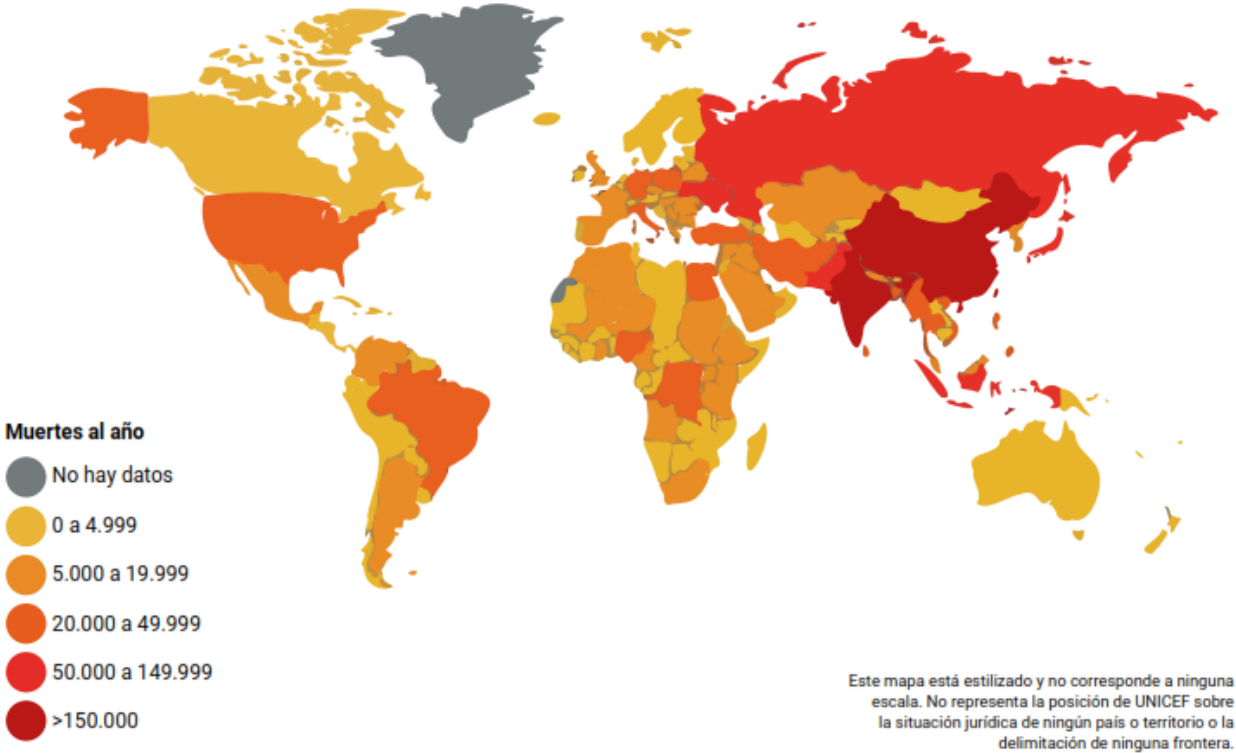


Figura 2. Muertes atribuibles a la contaminación del aire (Daly & Cognuck, 2021).

2.1.1 Contaminación de aire en interiores

La contaminación de aire en interiores se refiere a la alteración de la calidad del aire (Figura 3) en lugares cerrados como hogares, oficinas, edificios públicos, hospitales, laboratorios y demás sitios. La contaminación en ambientes interiores está relacionada con el asma, síntomas de alergia, además de diversas enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como cáncer de pulmón. Se estima que las personas radican en áreas urbanas transcurren entre el 80 y el 90 % de su tiempo realizando actividades sedentarias en interiores, relacionadas al trabajo y tiempo de ocio, lo cual se incrementó durante la pandemia de COVID-19.

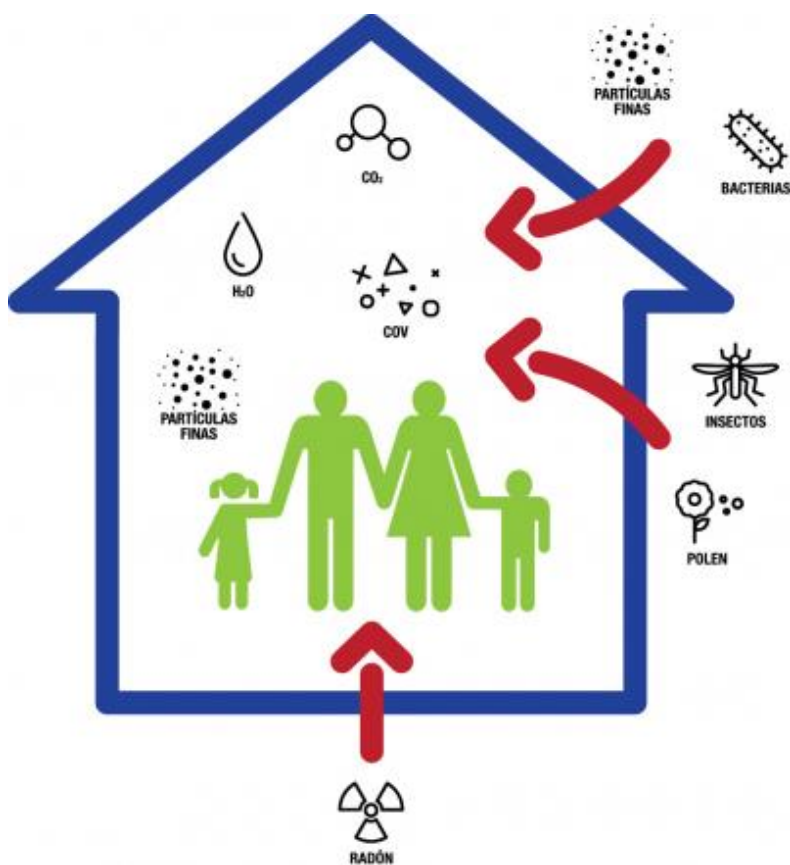


Figura 3. Mala calidad del aire en interiores (ALDES, s.f.)

En la literatura, la concentración de COV en microambientes interiores y exteriores se ha reportado que:

- 1) En la Ciudad de México se midieron los niveles de monóxido de carbono (CO), benceno y otros COV, así como partículas en suspensión PM_{2.5} y PM₁₀ dentro de vehículos de transporte público, antes y después de un nuevo sistema de autobuses de tránsito rápido (*Bus Rapid Transit*, BRT), que se implementó a lo largo de 20 km en la Avenida Insurgentes en junio del 2005. La implementación del sistema BRT resultó en la reducción de la exposición de los viajeros al CO, benceno y PM_{2.5} que oscilan entre el 20% y el 70%; no se observaron reducciones significativas en la exposición a PM₁₀. Los tiempos de viaje menores redujeron aún más la exposición total de los pasajeros. Es probable que las principales fuentes que contribuyen a los COV en todos los modos de transporte estén relacionadas con el tráfico y las emisiones derivadas del uso de gas licuado de petróleo. Los resultados sugieren que los sistemas BRT podrían, en general, ser un medio eficaz para reducir la exposición humana a los contaminantes del aire relacionados con la congestión vehicular y los impactos en la salud asociados (Wöhrnschimmel *et al.*, 2008).
- 2) En El Paso, Texas, en las escuelas cercanas a la carretera se reportó que el tolueno era el compuesto predominante dentro del grupo de BTEX y las concentraciones promedio al aire libre en 96 horas, determinadas por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), variaban de 1.16 a 4.25 g/m³ en las cuatro escuelas primarias en la primavera del 2010, lo que sugiere una fuente común: las emisiones del tráfico vehicular (Raysoni *et al.*, 2017).
- 3) En la ciudad de Sakaka, KSA, se midieron las concentraciones del grupo BTEX en ambientes interiores y exteriores en cuatro imprentas y dos centros de fotocopias; se recolectaron 54 muestras de BTEX utilizando monitores de difusión pasivos (SKC VOC-575) y se analizaron por GC-MS. Los resultados mostraron que el tolueno era el compuesto más predominante dentro del grupo BTEX y sus niveles en interiores eran mucho más altos que en exteriores. Las concentraciones promedio en interiores (µg/m³) variaron de 2.45 a 14.66, 81.59 a 955.65, 11.19 a 97.35, 35.66 a 291.88 y 3.90 a 28.39 para benceno, tolueno, etilbenceno, m/p-xileno y o-xileno, respectivamente. Las proporciones interiores/exteriores de concentraciones de especies de BTEX fueron más de uno en la mayoría de los casos, lo que indica el efecto de las fuentes de emisión en interiores. Según las proporciones

(tolueno/benceno), todos los sitios se vieron afectados por las emisiones del tráfico. La eficiencia de la ventilación, el tipo de tinta y la concentración de contaminantes en el exterior son responsables de la disparidad de resultados; se evaluaron los riesgos cancerígenos y no cancerígenos en los ambientes interiores calculando el riesgo en *Lifetime Cancer Risk* (LCR) y el *Hazard Ratio* (HR), respectivamente (El-Hashemy & Ali, 2018).

- 4) En Teherán, Irán, hubo una caracterización espacio-temporal en la variación de la concentración de compuestos BTEX en las cercanías de estaciones de gas y gas natural comprimido (*Compressed Natural Gas*-GNC), donde los valores promedio de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno en invierno fueron de 466.09 ± 132.25 , 873.13 ± 233.51 , 493.05 ± 141.22 y 910.57 ± 145.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Este estudio motiva a revisar las estrategias de mitigación para limitar los efectos en la salud de las emisiones cancerígenas como el benceno y el etilbenceno de las estaciones de gas/GNC (Jafari *et al.*, 2021).
- 5) En Yangon, Myanmar, se utilizaron cuatro tipos de muestreadores de aire por difusión para medir compuestos orgánicos volátiles, compuestos de ozono y carbonilo, gases ácidos y amoníaco. Como resultado de este estudio, se encontró que los alcanos más altos son dominantes entre los COV al aire libre. Las proporciones de benceno/tolueno variaron de 0.15 a 0.53, mientras que las proporciones de formaldehído/acetaldehído variaron entre 1.5 y 2.4. El valor máximo de ozono exterior fue de $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las proporciones interiores/exteriores en algunos sitios revelaron que había fuentes interiores de α -pineno, d-limoneno, p-diclorobenceno y metil-isobutil-cetona. Se encontró que la calidad del aire exterior estaba contaminada con diversas sustancias, la mayoría de los cuales están relacionados con el tráfico, lo que indica que en la actualidad la ciudad enfrenta un mayor volumen de tráfico que antes. La calidad del aire interior varió con las características interiores de los edificios, en donde se identificaron gases que representan problemas a la salud en el aire interior. Una ventilación inadecuada puede generar una mala calidad del aire en interiores (Aung *et al.*, 2019).

2.1.2 Partículas suspendidas

Las partículas suspendidas también reciben el nombre de material particulado, aeropartículas y aerosoles, son mezclas de compuestos con un tamaño muy pequeño a microscópico (Figura 4), en estado líquido y sólido que están suspendidos en el aire; tales como polvo, humo, hollín y neblinas. El tamaño y la composición se consideran como los parámetros más importantes para determinar su comportamiento, permanencia en la atmósfera, así como de potencial afectación para el medio ambiente y la salud. Existe una gran variedad de fuentes de emisión de estas partículas, dentro de las principales se encuentran vehículos automotores, actividades domésticas, plantas de generación eléctrica y procesos mecánicos o fotoquímicos (INE-SEMARNAT, 2006; Rojas & Garibay, 2003).

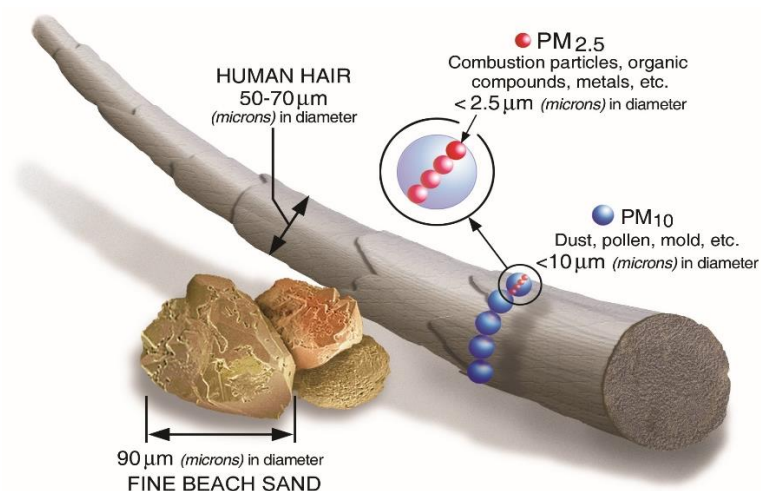


Figura 4. Comparación de material particulado (PM) (Environmental Protection Agency, 2023).

2.1.2.1 Clasificación de las partículas suspendidas

Existen diversas formas de clasificar las partículas suspendidas en base a diferentes criterios, entre los más comunes se encuentran (INE-SEMARNAT, 2006):

- **Origen:** Las cuales se distinguen en partículas primarias y secundarias
 - Partículas primarias: Aquellas que son emitidas directamente a la atmósfera a partir de diversas fuentes.

- Partículas secundarias: Como producto de reacciones químicas entre especies gaseosas, llamadas precursoras. Los principales gases particulados secundarios son el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el amoníaco (NH₃), principalmente formación de partículas de sulfato y nitrato y partículas orgánicas secundarias en suspensión resultantes de la oxidación fotoquímica de sustancias orgánicas.
- **Tamaño:** El diámetro aerodinámico se utiliza como indicador del tamaño de las partículas, ya que las partículas en suspensión se presentan de muchas formas, de esta manera se puede determinar la forma en que el aire y la suciedad son absorbidos, incluido el transporte y sus trayectorias durante la respiración. La mayoría de las partículas son menores de 40 µm, y de acuerdo con diversos estudios sobre los efectos en la salud de las partículas que se encuentran en el medio ambiente, se ha encontrado que estas partículas, que son menores de 10 µm (PM₁₀), pueden ser inhaladas por las vías respiratorias, que se denomina fracción inhalable. La fracción gruesa consiste en partículas con un diámetro aerodinámico de 2.5–10 µm (PM_{2.5-10}), la fracción fina contiene partículas con un diámetro aerodinámico de menos de 2.5 µm (PM_{2.5}), la fracción ultrafina se refiere a estas partículas menores a 1 µm (PM₁). La Tabla 1 a continuación muestra el proceso de formación de partículas basado en el tamaño de las partículas.

Tabla 1. Principales procesos de formación de las partículas suspendidas según su tamaño (INE-SEMARNAT, 2006).

Tipo de partículas		
Ultrafinas (PM_{0.1})	Finas (≤PM_{2.5})	Gruesas (PM_{2.5}-PM₁₀)
-Nucleación de gases atmosféricos, H ₂ SO ₄ , NH ₃ y compuestos orgánicos. -Condensación de gases.	-Condensación de gases. -Coagulación de partículas pequeñas. -Reacción de gases sobre las partículas. -Evaporación de la neblina y las gotas de agua contaminadas.	-Procesos mecánicos (prensado, molienda, abrasión). -Evaporación de aerosoles. -Suspensión de polvos. -Reacción de gases sobre partículas.

El tamaño de las partículas es un factor clave que influye en la eficacia y la complejidad de los métodos de remoción. Generalmente, las partículas gruesas son más fáciles de eliminar de un flujo de aire, ya que pueden ser atrapadas y separadas por métodos físicos más simples, como filtros de malla gruesa o sedimentación. Las partículas finas se consideran de moderada complejidad, resultan más complicadas de remover que las partículas gruesas pero aún pueden ser tratadas con métodos físicos convencionales, como filtros de alta eficiencia, ciclones o separadores de inercia; en algunos casos, este tipo de partículas puede requerir tecnologías de control de la contaminación más avanzadas, como precipitadores electrostáticos o filtros de mangas. Para la remoción de partículas ultrafinas, generalmente se requieren tecnologías más avanzadas y costosas debido a su tendencia a permanecer en suspensión, como los procesos de oxidación avanzada o los métodos biológicos (Seinfeld & Pandis, 2016).

2.1.3 Compuestos Orgánicos Volátiles

Los Compuestos Orgánicos Volátiles son compuestos orgánicos con una composición vaporizable en condiciones normales de temperatura y presión atmosférica. Otra forma de referirse a esos compuestos orgánicos es con respecto al punto de evaporación, el cual debe ser menor o igual a 250 °C, en una condición estándar de presión atmosférica de 101.3 kPa o 1013 mbar (USEPA, 2016).

Los COV se liberan a la atmósfera desde diversas fuentes (ambientales y antropogénicas) y pueden permanecer en el medio ambiente desde minutos hasta años. Sus principales emisiones provienen de actividades humanas, incluyendo la quema de sitios y fuentes móviles, el almacenamiento, distribución y adquisición de terrenos de petróleo, y las emisiones del sector industrial que provee el uso del metal. Diversos estudios han demostrado que las principales fuentes de emisión de COV son los vehículos de gasolina y diésel, seguidos del manejo y distribución de GLP.

En la década de 1950, Haagen-Smit estableció el papel y la importancia de los COV antropogénicos en la química atmosférica. En sus estudios sobre el smog en Los Ángeles, identificó que la oxidación de estos compuestos en presencia de la luz solar y los óxidos de nitrógeno juega un papel importante como fuente de ozono y otros oxidantes (INECC, 2015).

Algunos COV presentes en la atmósfera pueden presentar un riesgo a la salud debido a sus características tóxicas o carcinogénicas, mientras que, otros son responsables de la formación de contaminantes secundarios como el ozono (O₃). Tal variedad depende de la volatilidad de los productos de oxidación, la abundancia atmosférica y la reactividad química (Senfiled & Pandis, 2006). La concentración de contaminantes secundarios en los niveles del suelo puede depender en el número de contaminantes primarios, en el caso del ozono, su formación dependerá de los COV y óxidos de nitrógeno (NO_x) que pueden reaccionar fotoquímicamente con la radiación solar. Por estas razones, es necesario identificar las especies químicas presentes de COV y sus fuentes (Reynoso, 2009).

En la literatura, la concentración de COV en microambientes interiores y exteriores ha sido reportada en la Ciudad de México (Wöhrnschimmel, *et al.*, 2008), El Paso, Texas (Raysoni *et al.*, 2017), Ciudad de Sakada, KSA (El-Hashemy & Ali, 2018), Tehran, Irán (Jafari *et al.*, 2021) and Yangon, Myanmar (Aung *et al.*, 2019).

2.1.4 BTEX

Entre los COV, el grupo de hidrocarburos aromáticos llamado BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y o-, m-, p-Xileno, Figura 5) tiene gran relevancia, ya que, en los centros urbanos, la mayoría de los COV (aproximadamente el 60%) son BTEX. Los BTEX existen a temperatura ambiente, y son insolubles en agua, pero muy solubles en otras sustancias. Además de ser nocivos para la salud de los seres humanos, pueden crear contaminantes secundarios como Aerosoles Orgánicos Secundarios (AOS), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂), este último es considerado como uno de los principales gases de efecto invernadero (De la Rosa Fernando & Ramírez Peñaherrera, 2012).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), un compuesto orgánico se denominará COV si el punto de ebullición se encuentra dentro del rango de 50°C-100°C hasta 240°C-260°C. Los hidrocarburos aromáticos tienen estructuras cíclicas no saturadas (con múltiples enlaces) en los enlaces carbono-carbono del anillo. La mayoría de los hidrocarburos aromáticos están basados en moléculas de benceno (Petrucci *et al.*, 2011). Debido a las

propiedades físicas de los BTEX (temperatura de evaporación) también son considerados COV, los cuales tienen gran importancia en la formación de ozono troposférico como resultado de reacciones fotoquímicas en la parte inferior de la atmósfera. En el monitoreo de la calidad del aire, el benceno es utilizado como un primer indicador, seguido del tolueno, en tercera posición el etilbenceno y por último el xileno, debido a eso su nombre en agrupación, BTEX (Gallego *et al.*, 2012).

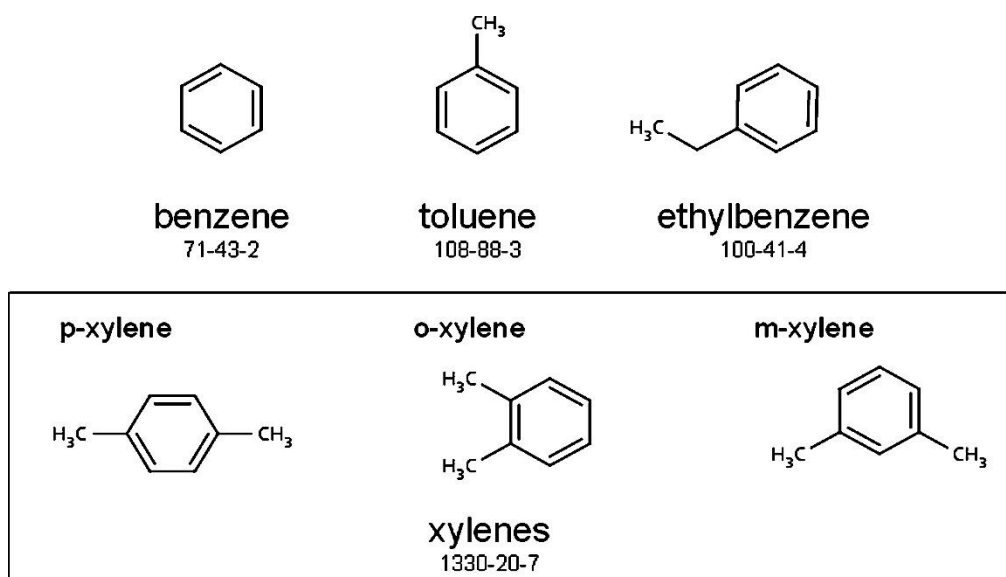


Figura 5. Estructura y número CAS de los BTEX (Bolden *et al.*, 2015).

- **Benceno:** su fórmula química es C_6H_6 , considerado como un hidrocarburo aromático altamente inflamable, también tiene características tóxicas, que pueden significar un riesgo a la salud, produciendo enfermedades crónicas y agudas. La inhalación de benceno presenta un riesgo para mujeres embarazadas, ya que este compuesto puede llegar al feto a través de la sangre. En el caso de los animales en gestación, es conocido que el benceno provoca en las crías bajo peso al nacer, retraso en la formación ósea y daño a la médula ósea. El benceno está clasificado como carcinógeno por la *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) y la *International Agency for Research on Cancer* (IARC). La inhalación prolongada de los vapores de benceno provoca una disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, lo que puede provocar la muerte (Petrucci *et al.*, 2011; SMA-GDF *et al.*,

2008). Entre las fuentes antropogénicas que emiten benceno se encuentran las industrias, las cuales utilizan este compuesto químico para producir estireno, cumeno y ciclohexano, entre otros; también se puede emitir en la manufactura de caucho, lubricantes, detergentes, colorantes, fármacos y pesticidas; al igual que el aceite, gasolina y el humo de los cigarrillos emiten benceno. Las fuentes naturales incluyen las emisiones volcánicas y los incendios forestales. El manejo inadecuado de los residuos que contienen benceno, los derrames y las fugas provocan que esta sustancia sea liberada en el suelo o en el agua, favoreciendo la volatilización y la permanencia de estos en la capa inferior de la atmósfera, hasta que reaccionen fotoquímicamente con otras sustancias o sean arrastrados por la lluvia o nieve (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2007).

- **Tolueno:** también conocido como metilbenceno ($C_6H_5CH_3$), es un compuesto incoloro, líquido inflamable con olor fuerte y dulce (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2016). El tolueno es utilizado como un solvente y diluyente de pinturas de celulosa y barnices; se encuentra en la formulación de productos de limpieza en diferentes industrias y artesanías, también es utilizado en la manufactura de detergentes y piel artificial; el tolueno es un componente del combustible para aviones y de la gasolina para automóviles (Spiegel & Maystre, 2007). Este compuesto a bajas concentraciones en el aire del ambiente puede provocar fatiga, náuseas, confusión, debilidad, así como, pérdida del apetito, audición y visión, una vez que la exposición al tolueno finaliza, los síntomas desaparecen por lo general, sin embargo, inhalar altos niveles incluso en periodos cortos, pueden causar mareos, somnolencia, pérdida de la conciencia e incluso la muerte. Respirar niveles muy altos durante el embarazo puede provocar problema en los niños, abarcando desde efectos en el nacimiento hasta retraso en la habilidad mental y desarrollo. Diversos estudios en humanos y animales, indican que la exposición al tolueno no provoca cáncer (SMA-GDF *et al.*, 2008). En nuestra legislación nacional, el contenido de benceno debe ser controlado (principalmente en áreas metropolitanas), pero es normal observar que el contenido de tolueno es tres o cuatro veces mayor que el benceno en la gasolina, debido a la

toxicidad del benceno (Pekey & Yilmaz, 2011; NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, 2005).

- **Etilbenceno:** su fórmula química es C_8H_{10} , conocido como un líquido incoloro, un líquido inflamable con olor a gasolina. Se encuentra en alquitranes, aceites, pinturas, pesticidas y solventes; es ampliamente utilizado en la producción de estireno y otros productos químicos, forma parte de los derivados del petróleo y se utiliza especialmente como solvente en otras industrias. (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2016). La exposición a estos compuestos ocurre principalmente cuando se respira aire contaminado con estos, especialmente en áreas cercanas a fabricas o a carreteras. La información actual enumera mareos, dolor de garganta, dolor de ojos, opresión en el pecho y ardor en los ojos como síntomas de exposición a concentraciones de etilbenceno. Los estudios en animales han informado efectos sobre el sistema nervioso, el hígado, los riñones y los ojos. (SMA-GDF *et al.*, 2008).
- **Xileno:** es presentado por la fórmula $C_6H_4(CH_3)_2$, es un líquido incoloro, altamente inflamable y de olor dulce, que se encuentra en el petróleo y el alquitrán. Dependiendo de la posición del grupo metilo en el anillo aromático, los xilenos se clasifican en tres tipos: orto-, meta- y para-xileno (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2016). El producto comercial es una mezcla de isómeros con "meta" en la mayoría (60% a 70%) y "para" en la minoría (alrededor del 5%). El xileno se utiliza para diluir en la fabricación de pinturas y tintas, medicina o como aditivo de octanaje en el combustible de aviación, la fabricación de tintes y la fabricación de ácido ftálico, debido a que el xileno es un buen disolvente para las ceras de parafina, el bálsamo de Canadá y el poliestireno también se han utilizado en histología (Spiegel & Maystre, 2007). El xileno se puede absorber a través de los pulmones y la piel sin causar efectos adversos en el medio ambiente. Sin embargo, la actividad prolongada de alta intensidad puede causar dolores de cabeza, falta de coordinación muscular, mareos, confusión y desorientación. La exposición a corto plazo a altas concentraciones puede causar irritación de la piel, los ojos, la nariz y la garganta, dificultad para respirar, problemas pulmonares, respuesta lenta a los estímulos, problemas de memoria,

malestar estomacal y problemas hepáticos y renales. Altas concentraciones de xileno pueden causar desmayos y muerte. La USEPA y la IARC dicen que no hay suficientes datos disponibles para determinar si el xileno causa cáncer (SMA-GDF *et al.*, 2008).

En la siguiente Tabla 2, 3 y 4 se resumen los efectos a la salud de los BTEX:

Tabla 2. Efectos del benceno sobre la salud (ASTDR, 2007a, 2007b, 2010 y 2017).

Contaminante	Efecto a la salud
Benceno	Sistema inmunológico: daño a la respuesta humoral (anticuerpos) y celular (leucocitos). Alteraciones cromosómicas en linfocitos y células de la médula ósea. Disminución de los niveles de anticuerpos y leucocitos, por lo tanto, efectos sobre el sistema inmunológico por la exposición por inhalación.
	Hematológicos: Citopenia, lo que significa una disminución de varios elementos celulares de la sangre circulante que se manifiesta como anemia, leucopenia o trombocitopenia en humanos. Leucemia no linfocítica, leucemia mielógena aguda por la exposición ocupacional al benceno o compuestos que lo contienen.
	Gastrointestinales: Fibrilación ventricular en exposiciones muy grandes al vapor de benceno, gastritis congestiva, gastritis tóxica y congestión renal.
	Piel y ojos: Irritación de los ojos y de la piel, quemaduras después de la exposición a los vapores de benceno.
	Sistema nervioso: Congestión vascular en el cerebro debido a la exposición fatal por inhalación, la exposición crónica se asocia con neuropatía distal, dificultad para dormir y pérdida de memoria. Estas exposiciones también están relacionadas con la depresión de los sistemas nerviosos central y periférico.
	Cáncer.
	Muerte.

Tabla 3. Efectos del tolueno y etilbenceno sobre la salud (ASTDR, 2007a, 2007b, 2010 y 2017).

Contaminante	Efecto a la salud
Tolueno	Sistema respiratorio: Irritación del tracto respiratorio, lesiones pulmonares, degeneración olfativa nasal reversible, infiltración de células inflamatorias en las regiones peribronquiales y alveolares, edema alveolar, fibrosis intersticial y necrosis.
	Sistema cardiovascular: Alteraciones del ritmo cardíaco.
	Musculo esquelético: Rabdomiólisis (enfermedad aguda de los músculos esqueléticos que provoca la degradación del tejido muscular que conduce a la liberación de mioglobina en la sangre y la orina).
	Piel y ojos: Irritación de la piel y los ojos.
	Sistema nervioso: Síntomas neurotóxicos (ataxia, temblor, incapacidad para caminar), narcosis, daño permanente al sistema nervioso central, capacidad reducida en las pruebas de función cognitiva y neuromuscular, pérdida auditiva y de la visión del color, disminución de la actividad locomotora, problemas de memoria y/o aprendizaje, alteración de la coordinación motora y los reflejos, así como mareos.
	Muerte.
Etilbenceno	Piel y ojos: Irritación ocular.
	Sistema respiratorio: Irritación nasal, de garganta y del tracto respiratorio, congestión pulmonar.
	Hematológicos: Aumento del recuento de linfocitos y leucocitos, y disminución de los niveles de hemoglobina y plaquetas.
	Hepáticos: Necrosis e hipertrofia en el hígado y aumento de peso del hígado.
	Renales: Enfermedad renal, hiperplasia del túbulo renal, adenomas tubulares renales y carcinomas.
	Sistema endocrino: Hiperplasia tiroidea e hipofisaria.

Tabla 4. Efectos del xileno sobre la salud (ASTDR, 2007a, 2007b, 2010 y 2017).

Contaminante	Efecto a la salud
Xileno	Sistema respiratorio: Irritación respiratoria, deterioro del desempeño de las funciones pulmonares, irritación de la nariz y la garganta, congestión pulmonar, hemorragia e inflamación pulmonar.
	Sistema cardiovascular: Taquicardia.
	Gastrointestinales: Náuseas, vómitos, malestar gástrico.
	Hepáticos: Vacuolización hepática.
	Ojos: Irritación ocular leve y transitoria.
	Neurológicos: Deterioro de la memoria a corto plazo, disminución del rendimiento en la capacidad numérica, deterioro del equilibrio y del cuerpo, así como mareos.

2.2 Normatividad relacionada con los contaminantes en el aire

Se están realizando diversos esfuerzos para controlar y mejorar la calidad del aire en todo el mundo, especialmente en ciudades o regiones con altos niveles de partículas suspendidas. Diferentes países, incluido México, han establecido normas de calidad para la contaminación del aire y otros contaminantes, incluidas medidas de respuesta y prevención, destinadas a controlar la calidad del aire. Se dan estándares o normas para estos contaminantes para determinar límites de emisión en diferentes regiones y, de ser posible, las cantidades ambientales consideradas para una buena calidad del aire (INE-SEMARNAT, 2006; Rojas & Garibay, 2003).

2.2.1 Normatividad internacional

La Organización Mundial de la Salud tiene un documento oficial sobre la calidad del aire y la salud, la llamada Guía de Calidad del Aire (GCA). Para proteger al público de los efectos en la salud de la contaminación del aire, la cual recomienda concentraciones máximas de partículas, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y ozono.

El GCA está diseñado para uso internacional y está diseñado para apoyar actividades destinadas a lograr una calidad del aire consistente con la protección de la salud pública. Independientemente de si un país establece estándares de calidad del aire, la GCA sirve como una parte importante de las políticas nacionales de gestión ambiental y de riesgos. La GCA se basa en una amplia evidencia científica sobre la contaminación del aire y sus efectos en la salud.

Se han encontrado exposiciones consideradas perjudiciales para la salud en muchas ciudades de países en desarrollo en pruebas de O₃ y PM. Un número creciente de efectos adversos para la salud están asociados con la contaminación del aire, incluso a niveles más bajos de lo esperado, como PM. El control de la contaminación del aire a través del monitoreo remoto de contaminantes también parece estar aumentando. Además de los valores recomendados, se desarrollan objetivos intermedios para cada contaminante y se proponen métodos para reducir gradualmente la contaminación del aire para su uso en áreas de alto riesgo.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) es una organización establecida en colaboración con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Su cuarto informe muestra que la principal manifestación del cambio climático es un aumento de la temperatura del núcleo terrestre, que aumenta alrededor de 0.3°C cada diez años. Esto es lo que se espera que enfrente el mundo para 2030 debido a los gases de efecto invernadero que se han bombeado a la atmósfera desde el comienzo de la Revolución Industrial.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) tiene el mandato del Congreso de los Estados Unidos de establecer estándares nacionales para la calidad del aire, la autorregulación y la prevención de la contaminación. Los esfuerzos para implementar la Ley de Aire Limpio han reducido drásticamente la contaminación del aire y han evitado miles de casos de problemas de salud; entre 1970 y 2017, las emisiones totales de los seis contaminantes más comunes se redujeron en un 73 %. Las emisiones de los siguientes contaminantes del aire seguirán disminuyendo en comparación con los niveles informados de 1990:

- El monóxido de carbono (CO) se ha reducido en un 75%.
- Amoníaco (NH₃) reducido en un 22%.
- 58% de reducción de óxidos de nitrógeno (NO_x).
- Reducción del 29 % en partículas de 2,5 micras (PM_{2,5}).
- Las partículas de 10 micras (PM₁₀) se han reducido en un 25 %.
- 88% de reducción de dióxido de azufre (SO₂).
- Reducción del 40% de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).

También se informó una reducción del 68% en las emisiones de contaminantes atmosféricos entre 1990 y 2014. Esto se debe principalmente a la implementación de regulaciones de fuentes móviles y puntuales a nivel federal y estatal ya los avances tecnológicos. Los niveles reglamentarios de sustancias peligrosas de la EPA son los siguientes y se enumeran en la Tabla 5:

Tabla 5. Índice de Calidad de Aire establecido por la EPA (Programas Internacionales).

Contaminante	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Periodo promedio de exposición	Naturaleza legal	Excedentes permitidos cada año
PM _{2.5}	25	1 año	Valor por conseguir a partir del 1.1.2010 Límite por cumplir a partir del 1.1.2015	n/A
SO ₂	350	1 hora	Límite por cumplir a partir del 1.1.2005	24
SO ₂	125	24 horas	Límite por cumplir a partir del 1.1.2055	3
NO ₂	200	1 hora	Límite por cumplir a partir del 1.1.2010	18 años
NO ₂	40	1 año	Límite por cumplir a partir del 1.1.2010	n/A
PM ₁₀	50	24 horas	Límite por cumplir a partir del 1.1.2005	35
Pb	0.5	1 año	Límite por cumplir a partir del 1.1.2010 (o 1.1.2010, 1.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cerca de ciertas fuentes industriales notificadas y límite de 1.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ del 1.1.2005 al 31.12.2009)	n/A
CO	10 mg/m ³	Máxima medida diaria de 8 horas	Límite por cumplir a partir del 1.1.2005	n/A
Benceno	5	1 año	Límite por cumplir a partir del 1.1.2010	n/A
O ₃	120	Máxima medida diaria de 8 horas	Límite por cumplir a partir del 1.1.2010	25 días promedio durante 3 años

Tabla 5. Índice de Calidad de Aire establecido por la EPA (Programas Internacionales). *Continuación.*

Contaminante	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Periodo promedio de exposición	Naturaleza legal	Excedentes permitidos cada año
Arsénico	6 ng/m^3	1 año	Valor por conseguir a partir del 31.12.2012	n/A
Cd	5 ng/m^3	1 año	Valor por conseguir a partir del 31.12.2012	n/A
Ni	20 ng/m^3	1 año	Valor por conseguir a partir del 31.12.2012	n/A
Hidrocarburos	1 ng/m^3	1 año	Valor por conseguir a partir del 31.12.2012	n/A
NO ₂	40	1 año	Límite por cumplir a partir del 1.1.2010	n/A
PM ₁₀	50	24 horas	Límite por cumplir a partir del 1.1.2005	35
CO	10 mg/m^3	Máxima medida diaria de 8 horas	Límite por cumplir a partir del 1.1.2005	n/A
O ₃	120	Máxima medida diaria de 8 horas	Límite por cumplir a partir del 1.1.2010	25 días promedio durante 3 años
Arsénico	6 ng/m^3	1 año	Valor por conseguir a partir del 31.12.2012	n/A
Ni	20 ng/m^3	1 año	Valor por conseguir a partir del 31.12.2012	n/A
Hidrocarburos	1 ng/m^3	1 año	Valor por conseguir a partir del 31.12.2012	n/A

El índice de calidad del aire (AQI, *Air Quality Index*), por otro lado, se utiliza para informar la calidad del aire diario. Indica qué tan contaminado o limpio está el aire y los efectos en la salud asociados. Estos efectos centrados en humanos pueden ocurrir dentro de horas o días después de la exposición. Por esta razón, la EPA calcula los AQI para los cinco principales

contaminantes regulados por la Ley de Aire Limpio: partículas, ozono, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. Estos valores se enumeran en la Tabla 6 a continuación (Programas Internacionales, s.f.):

Tabla 6. AQI establecido por la EPA (Programas Internacionales).

AQI	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Descripción de la Calidad del Aire
0-50	0.0-15.4	0-54	Buena
51-100	40.5-65.4	155-254	Moderada
101-150	40.5-65.4	155-254	Insalubre para grupos sensibles
151-200	65.5-150.4	255-354	Insalubre
201-300	150.5-250.4	355-424	Muy insalubre

2.2.2 Normatividad nacional

La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es un organismo nacional que administra las normas que definen valores límite para los diferentes tipos de material particulado. Existen normas oficiales de emisiones para material particulado específico de la ruta, para vehículos nuevos de peso y consumo de combustible variables, para fuentes estacionarias y para material particulado que quema combustibles fósiles.

Los criterios de aceptación (control de calidad del aire) emitidos por la Secretaría de Salud de México NOM-024-SSA1-1993, en los que se determina el valor positivo del número de material particulado en suspensión como aire ambiente NOM-025-SSA1-1993 para partículas PM_{10} , posteriormente se fusionaron las dos normas, y en la NOM-025 publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) en 2005, se introdujo el límite máximo permisible de $\text{PM}_{2.5}$ (LMP) (INE). -SEMANAT, 2006). La Tabla 7 a continuación resume los controles de contaminación del aire relacionados con las NOM:

Tabla 7. Normas mexicanas que establecen los niveles máximos de emisión de partículas a la atmósfera para fuentes fijas (INE-SEMARNAT, 2006).

Norma	Aplicación
NOM-040-SEMARNAT-2002: Protección ambiental; fabricación de cemento hidráulico; niveles máximos de emisión a la atmósfera.	Se aplica a las fuentes fijas destinadas a producir cemento hidráulico utilizando combustibles convencionales, o mezclas con otras sustancias o residuos combustibles.
NOM-043-SEMARNAT-1993: Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.	Aplica para fuentes fijas emisoras de partículas sólidas a la atmósfera, excepto aquellas amparadas por normas oficiales mexicanas específicas.
NOM-085-SEMARNAT-1994: Fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles, líquidos, gaseosos o cualquiera de sus combinaciones. Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. Requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento o indirecto por combustión, así como niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.	Se aplica a fuentes de energía estacionarias que utilicen calentamiento indirecto por combustión utilizando combustibles fósiles, combustibles líquidos, combustibles gaseosos o una combinación de los mismos, o generación de energía mediante tecnología de ciclo combinado.
NOM-097-SEMARNAT-1995: Límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de material particulado y óxidos de nitrógeno en los procesos de fabricación de vidrio en el país.	Se aplica a la industria del vidrio con hornos de fusión de vidrio superiores a 5 toneladas por día.
NOM-105-SEMARNAT-1996: Niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera de partículas sólidas totales y compuestos de azufre reducido total provenientes de los procesos de recuperación de compuestos químicos de las plantas de fabricación de celulosa.	Aplicado en el proceso de recuperación de químicos en la producción de celulosa.

Tabla 7. Normas mexicanas que establecen los niveles máximos de emisión de partículas a la atmósfera para fuentes móviles (INE-SEMARNAT, 2006).

Norma	Aplicación
<p>NOM-042-SEMARNAT-2003: Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3,857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diésel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos.</p>	<p>Esta disposición se aplica tanto a los vehículos nuevos fabricados en México como a los vehículos fabricados en otros países que finalmente se importan a México.</p>
<p>NOM-044-SEMARNAT-2006: Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diésel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor a los 3,857 kilogramos, así como para unidades nuevas con peso bruto vehicular mayor a 3.857 kilogramos equipadas con este tipo de motores.</p>	<p>Aplica para fabricantes, importadores y ensambladores de motores nuevos que utilicen diésel como combustible.</p>

Con respecto a los límites permisibles para determinados contaminantes se puede resumir lo siguiente Tabla 8:

Tabla 8. Normas Oficiales Mexicanas de calidad del aire ambiente (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, 2017).

Contaminante	Datos base utilizado para la evaluación	Exposición	Frecuencia tolerada	Valor límite indicador con el que se evalúa	Norma Oficial Mexicana
PM ₁₀	Promedio 24 horas	Aguda	No se permite	75 µg/m ³ máximo	NOM-025-SSA1-2014
		Crónica	--	40 µg/m ³ promedio anual	
PM _{2.5}	Promedio 24 horas	Aguda	No se permite	45 µg/m ³ máximo	
		Crónica	--	12 µg/m ³ promedio anual	
O ₃	Dato horario	Aguda	No se permite	0.095 ppm máximo	NOM-020-SSA1-2014
	Promedio móvil de 8 horas		No se permite	0.070 ppm máximo	
SO ₂	Promedio 8 horas	Aguda	1 vez al año	0.200 ppm segundo máximo	NOM-022-SSA1-2010
	Promedio 24 horas	Aguda	No se permite	0.110 ppm máximo	
	Dato horario	Crónica	--	0.025 ppm promedio anual	
NO ₂	Dato horario	Aguda	1 vez al año	0.210 ppm segundo máximo	NOM-023-SSA1-1993
CO	Promedio móvil de 8 horas	Aguda	1 vez al año	11 ppm segundo máximo	NOM-021-SSA1-1993
Pb	Promedio aritmético de tres meses	Crónica	No se permite	1.5 µg/m ³	NOM-026-SSA1-1993

La Secretaría de Salud a través de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) se encuentra desarrollando el “Proyecto de Normas Oficiales de México NOM-258-SSA1-201_Salud Ambiental: Normas para evaluar la calidad del aire

ambiente con respecto a los límites máximos permisibles de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX)” el cual se encuentra registrado en el Programa Nacional de Normalización 2015 (INECC, 2015).

2.3 Métodos de detección de contaminantes en el aire

La detección y medición de contaminantes atmosféricos se realiza mediante diversos métodos que son agrupados de acuerdo a los principios de medición (Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire, 2019a):

- **Muestreo pasivo:** Recoge contaminantes específicos adsorbiéndolos y/o absorbiéndolos en un sustrato químico de elección. Después de la exposición durante un período de muestreo apropiado (horas o meses), las muestras se envían al laboratorio para la desorción de contaminantes para el análisis cuantitativo.
- **Muestreo con bioindicadores:** Se utilizan semillas vivas como hortalizas, árboles y plantas, cuyas superficies actúan como receptores de contaminantes. Existe un gran interés en el uso de indicadores biológicos para estimar las condiciones ambientales, la calidad del aire y sus efectos; como la capacidad de las plantas para acumular contaminantes o para comparar los efectos de los contaminantes en el metabolismo, el comportamiento de las plantas, etc.
- **Muestreo activo:** Se requiere energía eléctrica para extraer el aire a inspeccionar a través de un medio de recolección físico o químico.
- **Método automático:** Estos se basan en las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes y se consideran el mejor método debido a la alta resolución de las medidas, lo que permite medidas continuas en el tiempo y concentraciones más bajas. El espectro de contaminantes de este método varía desde contaminantes de referencia (PM, CO, SO₂, NO₂, O₃) hasta contaminantes tóxicos del aire (Hg, COV). Las muestras recolectadas se analizan utilizando varios métodos, como espectroscopia y cromatografía de gases. Estos métodos tienen ventanas que proporcionan automáticamente valores de concentración en tiempo real a medida que se cargan las muestras en el sistema.

- **Método óptico de recepción remota:** Estos se basan en técnicas espectroscópicas. Estos métodos permiten medir la concentración de varios contaminantes en tiempo real. A diferencia de los monitores automáticos, estos pueden proporcionar mediciones integradas de múltiples componentes a lo largo de rutas específicas en la atmósfera (típicamente mayor a 100 m). Estos dispositivos se conocen como sensores remotos.

2.3.1 Partículas suspendidas

Se utiliza una combinación de muestreo de alto volumen y métodos gravimétricos en laboratorio como método de referencia para medir las concentraciones de partículas en el aire ambiente. Con la ayuda del muestreo de partículas, se mide la concentración de todas las partículas en el aire en el aire ambiente. Sin embargo, a menudo también se utilizan filtros que contienen muestras para medir la concentración de otros elementos, como metales pesados, nitratos y sulfatos.

Este proceso consiste en hacer pasar aire exterior a una razón aproximada de 1 m³/min a través de un filtro de fibra de vidrio montado bajo una cubierta protectora que evita que el material se deposite directamente sobre el filtro. El muestreo es continuo durante un período de 24 horas. Este método retiene partículas suspendidas de menos de 50 mm de diámetro. Sin embargo, mejoramos el dispositivo para la recolección a gran escala para que también se puedan recolectar partículas de menos de 10 µm y menos de 2.5 µm (Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire, 2019b).

2.3.2 Compuestos orgánicos volátiles

Se considera muy compleja la identificación precisa de todas las posibles fuentes de emisión de COV, su distribución espacial, densidad, tipo de compuestos emitidos y su intensidad para determinar las formas de impacto identificadas (causalidad) de estas emisiones de COV en cada momento, información sobre como los COV afectan la calidad del aire en un área específica.

La técnica más utilizada para analizar los COV en el aire ambiente se basa en la cromatografía de gases. La cromatografía de gases es un instrumento analítico altamente especializado con capacidad, sensibilidad y resolución de múltiples componentes. Las mediciones se complican por el problema de identificar mezclas complejas de VOC, incluidos los VOC de una variedad de fuentes antropogénicas y naturales, además de los productos de oxidación atmosférica. Es importante considerar que existen muchos compuestos en el aire ambiente, la mayoría de ellos en bajas concentraciones. Los cromatógrafos de gases automatizados son muy adecuados para determinar el patrón de tiempo de las concentraciones de COV y para determinar sus valores máximo y promedio durante largos períodos de medición. Una de las principales ventajas de la cromatografía de gases es la capacidad de separar incluso especies químicas estrechamente relacionadas. Los detectores FID se utilizan comúnmente para esta identificación de especies individuales. Es muy adecuado para el análisis de muestras ambientales ya que contiene una amplia gama de compuestos orgánicos (Gómez, 2006).

2.3.3 BTEX

El Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales del Gobierno de España, cuenta con un método analítico aceptado por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) para la BTEX, el método MTA/MA-030/A92 “Determinación de hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno, p-xileno, 1,2,4-trimetilbenceno) en aire - Método de adsorción en carbón activo / Cromatografía de gases”, también puede aplicarse a compuestos de la misma familia como estireno, trimetilbencenos y otros xilenos, etc.

Este método se describe el procedimiento a seguir y el equipo necesario para la captación en un tubo de carbón activo y análisis por cromatografía de gases, de vapores en aire de cualquier mezcla de hidrocarburos aromáticos presentes en ambientes laborales. El método de análisis se desarrolló para determinar concentraciones medias ponderadas en el tiempo de vapores de hidrocarburos aromáticos en aire, mediante el uso de equipos de toma de muestras de bajo caudal, sin embargo, no puede medir concentraciones instantáneas o fluctuaciones de concentraciones en periodos cortos (MTA/MA-030/A92-Determinación de Hidrocarburos

Aromáticos (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, p-Xileno, 1,2,4-Trimetilbenceno) En Aire - Método de Adsorción En Carbón Activo / Cromatografía de Gases).

2.4 Métodos de tratamiento de aire

Los controles de los contaminantes atmosféricos pueden dividirse en tecnológicos y administrativos. Los tecnológicos se refieren a los equipos instalados en la fuente emisora para reducir los contaminantes liberados a un nivel aceptable para la comunidad, en especial para la población más sensible. Los controles administrativos se refieren a otras medidas de control, tales como: sustitución, extracción localizada, aislamiento, vigilancia, mantenimiento y limpieza (Spiegel & Maystre, 2007).

Dentro de las tecnologías de limpieza de aire se consideran los filtros de materiales fibrosos y los purificadores de aire electrónicos (ESPs), como los ionizadores y precipitadores electrostáticos, que son comúnmente utilizados. Los filtros con materiales fibrosos eliminan partículas del aire capturándolas en este material. Los ESPs ionizadores eliminan las partículas mediante un proceso activo de carga electrostática. Se pueden considerar otras tecnologías como la irradiación germicida ultravioleta, la cual está diseñada para reducir el número de microorganismos viables suspendidos en el aire por desactivación o matándolos.

Algunas tecnologías están diseñadas para eliminar contaminantes específicos en estado gaseoso o convertirlos en subproductos inocuos utilizando una combinación de procesos físicos y químicos. Estas tecnologías de limpieza de aire para contaminantes de fase gaseosa incluyen purificadores de material adsorbente (ej. carbón activado), oxidación fotocatalítica, plasma, entre otros. Cabe mencionar que el control de contaminantes de fase gaseosa es mucho más complejo que el control de PM (Environmental Protection Agency, 2019).

2.4.1 Partículas suspendidas

La eficiencia de un sistema de eliminación de partículas depende del tamaño de las partículas. De igual forma, se consideran dos tipos de desempeño: fraccional y acumulativo, donde el primero se refiere al desempeño del dispositivo de control para un tamaño de partícula particular y la eficiencia acumulativa solo representa el desempeño del dispositivo de control para un tamaño de partícula específico y las partículas de menores dimensiones.

Los receptores mecánicos, por otro lado, son dispositivos que utilizan la gravedad y la inercia para recolectar partículas; Se utilizan ampliamente en la industria debido a ventajas como el bajo costo, la capacidad de operar en entornos hostiles y los bajos requisitos de mantenimiento. Sin embargo, la principal desventaja de estos dispositivos es su baja eficiencia de recolección de partículas finas y, aunque algunos recolectores pueden alcanzar una alta eficiencia, tienen costos operativos más altos. Los principales colectores mecánicos son:

- **Cámaras de sedimentación:** Son los recolectores mecánicos más simples, se basan en un mecanismo de recolección gravitacional, evitan la abrasión excesiva al eliminar partículas grandes de la corriente de gas y se usan ampliamente a pesar de su baja tasa de recolección.
- **Purificadores:** También dependen de la gravedad para recolectar partículas; Consisten en uno o más tubos o torres verticales en serie, a través de los cuales aumenta el flujo de gas. Las partículas más grandes con una velocidad de sedimentación final mayor que la velocidad ascendente del gas se recogen en el fondo del tubo y las partículas más pequeñas se descargan al exterior. En el purificador se utilizan una serie de tubos de diámetro creciente para clasificar según el tamaño de las partículas recogidas.
- **Separadores por momento:** Utilizan la gravedad y la inercia para separar partículas de la corriente de gas. La separación se logra forzando el flujo de gas, cambiando de dirección en la cámara de sedimentación por gravedad mediante el uso de deflectores estratégicamente ubicados. Los separadores de momento son capaces de recoger

partículas muy pequeñas de hasta 10 μm , pero tienen una eficiencia baja (del 10 al 20%).

- **Ciclones:** Utilizan la inercia para eliminar partículas de la corriente de gas en rotación. Dentro del ciclón, la corriente de aire se ve obligada a girar dentro de una cámara que suele ser cónica; El gas fluye hacia abajo a través del ciclón en una espiral cerrada. En la parte inferior del ciclón, el gas gira y asciende en espiral a través del centro del tubo hasta la parte superior del ciclón. Las partículas en la corriente de gas son empujadas hacia la pared del ciclón por la fuerza centrífuga del gas, pero se ven obstaculizadas por la atracción del fluido del gas a través y fuera del ciclón. En las partículas grandes, el momento de inercia se refleja, lo que hace que las partículas abandonen el ciclón junto con el gas caliente. Además, la gravedad hace que las partículas más grandes que alcanzan la pared del ciclón sean transportadas hacia abajo y hacia un embudo colocado en el fondo (Kenneth, 1998).

2.4.2 Compuestos Orgánicos Volátiles

Los procesos comunes para reducir COV se dividen en métodos de recuperación y destrucción. Los métodos de recuperación incluyen técnicas de separación por membrana, absorción, adsorción y destrucción por condensación. Los métodos de destrucción incluyen principalmente la oxidación catalítica, biodegradación, oxidación térmica y catálisis de plasma.

Estos convierten los COV en CO_2 y H_2O , pero en general consumen una gran cantidad de energía para generar las altas temperaturas necesarias para la reacción, e inevitablemente producen algunos subproductos tóxicos como NO_x , O_3 , radicales OH, aerosoles orgánicos secundarios, etc. Por otro lado, la tecnología de adsorción, como un método de recuperación, es eficiente y económica. Las nanopartículas a base de carbono, como los nanotubos de carbono, carbón activado, el fullereno y el grafeno se explotan con mayor frecuencia para la adsorción de gases tóxicos presentes en el aire. El carbón activado (*Activated Carbon-AC*) es el material de adsorción más utilizado, ya que proporciona grandes superficies específicas, abundantes grupos funcionales, estabilidad química, alta resistencia mecánica, precios bajos

y resistencia química. No obstante, la adsorción suele no ser suficiente, por lo que recientemente han surgido tecnologías avanzadas de oxidación (*Advanced Oxidation Technologies-AOT*), incluida la oxidación Fenton, oxidación fotocatalítica, oxidación electroquímica, etc., que se consideran tecnologías prometedoras en la reducción de COV.

2.4.3 BTEX

Existe poca información respecto a la eliminación de BTEX, gran parte de lo reportado en la literatura se refiere únicamente a la identificación y seguimiento, sin embargo, existen pocos estudios que reporten sobre la tecnología de tratamiento, entre ellos el más popular es el uso de filtros biológicos, su operación se basa en el contacto entre el flujo de aire contaminado y la microflora (inmovilizada en materia orgánica sólida) dentro de un biorreactor. El contaminante de interés sería una fuente de carbono o energía para las bacterias aeróbicas presentes; lo convertirán mediante actividad metabólica en CO₂, biomasa y agua.

Estos sistemas de biofiltración han reportado altas eficiencias, sin embargo, la principal desventaja es el gran control y consideraciones que se necesitan para su adecuado funcionamiento, el soporte o material de relleno, cepas, contenido de humedad, temperatura, pH, por mencionar algunos (González, 2009).

3. ESTADO DEL ARTE

Algunas tecnologías de remoción de BTEX reportadas en la literatura, son las que se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9. Tecnologías de remoción de BTEX reportadas en la literatura.

Tecnología	BTEX que remueve	Eficiencia	Condiciones experimentales	Referencia
Plasma-catálisis	Tolueno	90%	Material: Au/CeO ₂ /Al ₂ O ₃ , Flujo: 200 mL/min, C _i = 100 ppm, t=18 h.	Zhu <i>et al.</i> , 2020
Biofiltros percoladores	Tolueno Xileno	90% (297.02 g/m ³ h tolueno inicial y 180.75 g/m ³ h xileno inicial)	Se emplearon cuatro filtros biopercoladores rellenos de espuma de poliuretano para identificar las interacciones entre cuatro compuestos aromáticos (benceno, tolueno, xileno y estireno), considerando las bacterias <i>Achromobacter</i> o <i>Burkholderia</i> .	Liao <i>et al.</i> , 2018
Fitorremediación	Benceno Tolueno Xileno Etilbenceno	100% (2 ppm BTEX con 1.18, 0.54, 1.35 y 1.64 mg/m ² d, respectivamente)	Plantas de <i>O. microdasys</i> de 3 años en macetas de 10 cm de diámetro en donde se adicionaron 2 ppm de BTEX a las cámaras de vidrio (volumen interno = 0.05 m ³), 20 ±3 °C, 12 h de luz y 12 h de oscuridad.	Mosaddegh <i>et al.</i> , 2014
Biofiltro	BTEX (mezcla)	<i>Aspergillus Brasiliensis</i> - la remoción es cercana al 100% para una entrada de 71.5 g/m ³ h.	El material de empaque fue una mezcla de bagazo de caña de azúcar y carbón activado granulado, los cuales se inocularon con hongos <i>Aspergillus Brasiliensis</i> y <i>Aspergillus Niger</i> en el biofiltro, por separado.	Mokhtarani <i>et al.</i> , 2013
		<i>Aspergillus Niger</i> - remoción total para la carga de entrada de 140.3 g/m ³ h.		

Tabla 9. Tecnologías de remoción de BTEX reportadas en la literatura. *Continuación.*

Tecnología	BTEX que remueve	Porcentaje de remoción	Condiciones experimentales	Referencia
Proceso termocatalítico de adsorción	Benceno Tolueno Xileno	87.47% con 37.21% de mineralización (300 °C) 94.03% con 90.42% de mineralización (300 °C)	Nanopartículas de óxido de cobre y hierro de valencia cero (30-60 nm) sobre un lecho de zeolita natural (Clinoptilolita) con granos de 1-2 mm, los cuales se colocaron en un filtro doble en un reactor cilíndrico de acero inoxidable ($\phi = 4.5$ cm y $h = 30$ cm). Los experimentos se llevaron a cabo en tres pasos: (1) con un flujo de aire de 1.5 L/min entre 38 a 600 °C (remoción y mineralización de BTX); (2) temperatura optimizada, se midió el efecto de la tasa de flujo y la tasa de carga de contaminación sobre la eliminación de BTX.	Jafari <i>et al.</i> , 2014
Biofiltros percoladores	Tolueno Xileno	90% (297.02 g/m ³ h tolueno inicial y 180.75 g/m ³ h xileno inicial)	Se emplearon cuatro filtros biopercoladores rellenos de espuma de poliuretano para identificar las interacciones entre cuatro compuestos aromáticos (benceno, tolueno, xileno y estireno), considerando las bacterias <i>Achromobacter</i> o <i>Burkholderia</i> .	Liao <i>et al.</i> , 2018

Tabla 9. Tecnologías de remoción de BTEX reportadas en la literatura. *Continuación.*

Tecnología	BTEX que remueve	Porcentaje de remoción	Condiciones experimentales	Referencia
Fitorremediación	BTEX	100% (2 ppm BTEX con 1.18, 0.54, 1.35 y 1.64 mg/m ² d, respectivamente)	Plantas de <i>O. microdasys</i> de 3 años en macetas de 10 cm de diámetro en donde se adicionaron 2 ppm de BTEX a las cámaras de vidrio (volumen interno = 0.05 m ³), 20 ±3 °C, 12 h de luz y 12 h de oscuridad.	Mosaddegh <i>et al.</i> , 2014
Proceso nanofotocatalítico de TiO ₂ /ZNO	Benceno Tolueno	Benceno (aprox): 25% (FC-UV 4 w/m ²) 37% (FC-UV 6 w/m ²) 80% (FC-UV 10 w/m ²) Tolueno (aprox): 90% (FC- UV 10 w/m ²) 76% (FC- UV 6 w/m ²) 60% (FC- UV 4 w/m ²)	Mezcla 50-50 de TiO ₂ nanofotocatalítico y ZNO (disuelto en etanol) empleando un reactor de 90 x 14 cm, con lámparas UV de 365 a 400 nm empleando entre 100 - 200 µg/m ³ (aire contaminado sintético).	Gholami <i>et al.</i> , 2014
Fotocatálisis	Tolueno	76.3%	Material: Fibra de carbón activado modificadas con BiOI/Bi ₂ WO ₆ , C _i = 500 mg/min ³ , t= 240 min.	Wang <i>et al.</i> , 2019
Catálisis y oxidación térmica	Tolueno	99.5%	Material: Nanofibras huecas de carbón activado modificadas con Mn ₃ O ₄ , C _i : 125 ppm, T: 280°C, Flujo: 0.2 L/min, t= 240 min.	Kang & Hwang, 2020

Tecnologías emergentes como la fotocatalisis que no han sido muy exploradas en la degradación de los BTEX, por lo que su empleo es una oportunidad en el desarrollo de tecnología de última generación para el tratamiento de aire contaminado. La fotocatalisis se basa en el principio de que cuando la luz a longitudes de onda adecuadas (la más atractiva es el uso de espectros solares) es absorbida por muchos semiconductores, el par electrón-hueco producido puede crear especies reactivas de oxígeno (*Reactive Oxygen Species-ROS*) que pueden descomponer moléculas orgánicas, como los COV (Aung *et al.*, 2019).

Un problema al que se enfrentan los reactores fotocatalíticos directos para la descontaminación del aire es debido a la compleja mezcla de contaminantes presentes en el medio, que incluye una amplia variedad de material particulado, ya que cubrirá la superficie del fotocatalizador provocando la reducción de su actividad. Por lo tanto, se recomienda incluir mecanismos para eliminar las partículas del gas residual. Estas partículas deben eliminarse de los gases residuales antes de la eliminación de los COV mediante tecnologías fotocatalíticas; un método eficaz para reducir el polvo en el aire es la precipitación electrostática (Environmental Protection Agency, 2019; USEPA, 2016).

Además, Shayegan, *et al.* (2018) reportaron que la oxidación fotocatalítica heterogénea (PCO, *Photo-Catalytic Oxidation*) es una tecnología prometedora para eliminar los contaminantes de COV en interiores. El TiO₂ ha sido considerado como el fotocatalizador más adecuado por su rentabilidad, alta estabilidad y gran capacidad para degradar varios COV. Sin embargo, ningún fotocatalizador a base de TiO₂ satisface completamente todos los requisitos prácticos, dada la corta vida útil de los portadores de carga foto-excitados y una amplia banda prohibida que requiere radiación ultravioleta (UV).

Se han examinado e informado estrategias para mejorar las actividades del fotocatalizador de TiO₂ mediante el dopaje con diferentes iones metálicos y/o no metálicos y mediante el acoplamiento con otros semiconductores. Estas técnicas pueden mejorar el rendimiento de la PCO a través de los siguientes mecanismos: (i) mediante la introducción de un nivel de captura de electrones en la banda prohibida que generaría algunos defectos en la red de TiO₂ y ayudaría a capturar los portadores de carga; (ii) ralentizando la tasa de recombinación del portador de carga y aumentando la degradación de los COV (Figura 6).

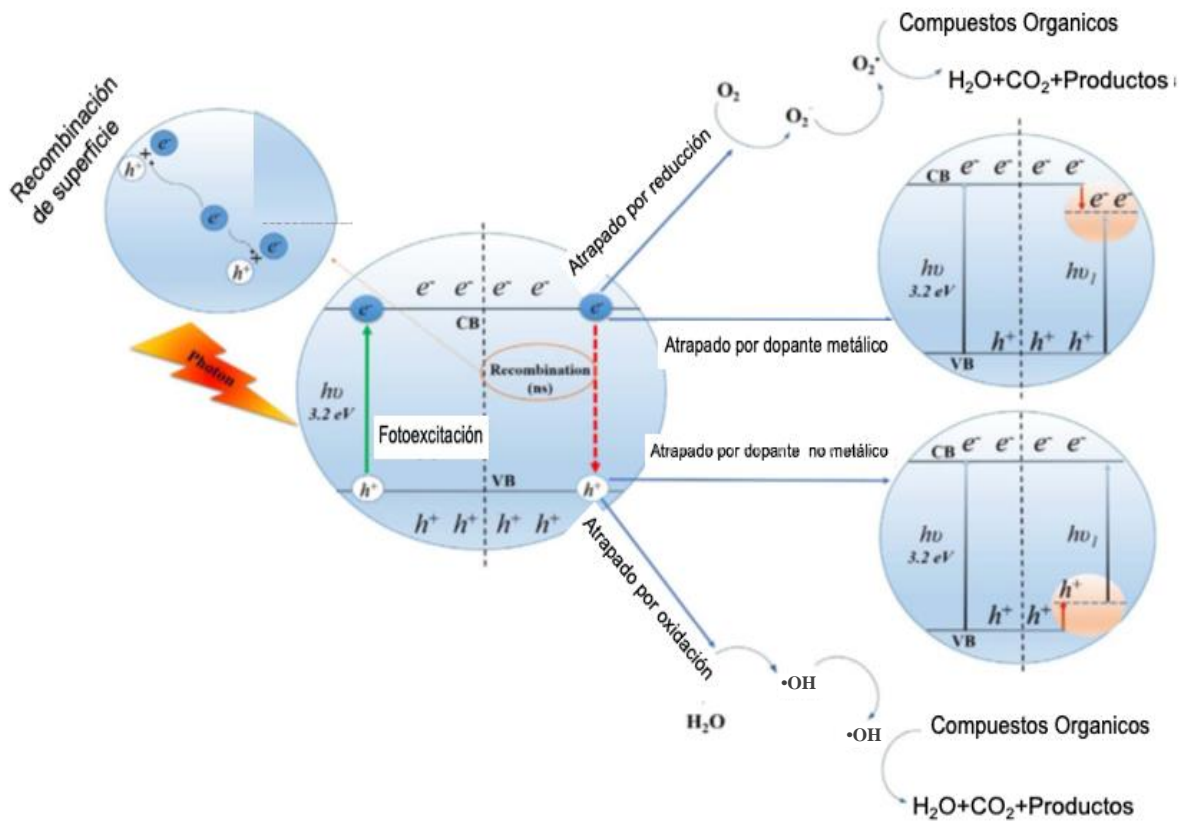


Figura 6. Principio básico de PCO para la eliminación de COV (Shayegan *et al.*, 2018).

Por lo tanto, se necesitan más investigaciones para determinar el tipo y la concentración óptimos de dopantes. La Figura 7 compara la influencia de diferentes cantidades de varios iones metálicos en la conversión de COV y muestra que una concentración óptima de dopantes mejora la conversión de contaminantes (Shayegan *et al.*, 2018).

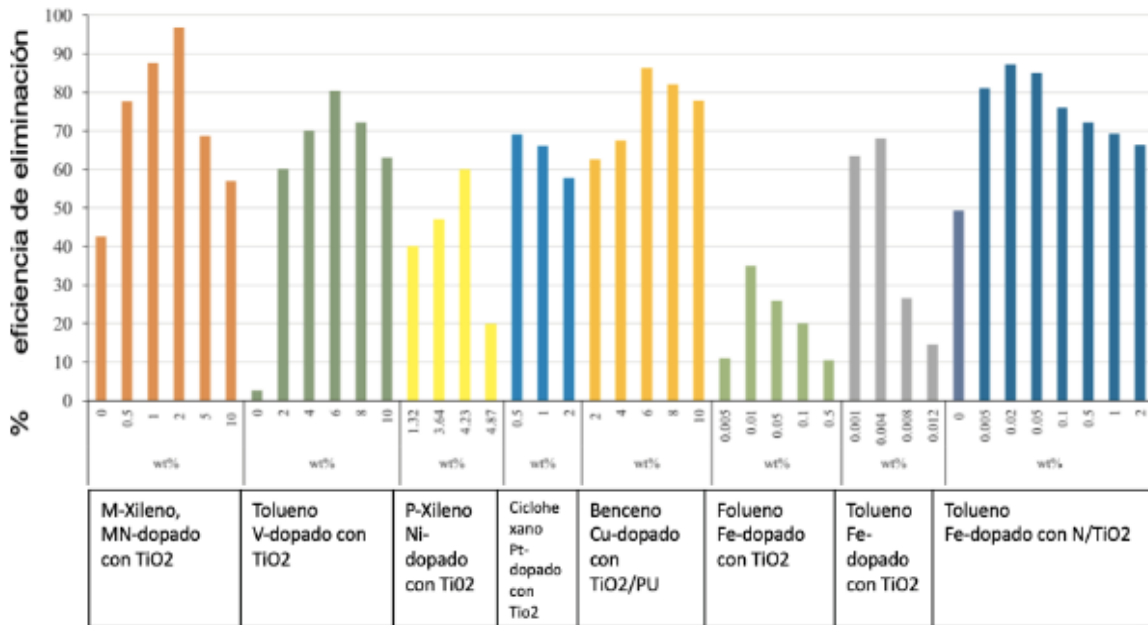


Figura 7. Influencia del número de diferentes dopantes metálicos (% en peso) sobre la degradación de los COV por el fotocatalizador de TiO₂ (Shayegan *et al.*, 2018).

El dopaje de Fe en la estructura de TiO₂ disminuye la recombinación de electrones y huecos y reduce los huecos de banda. La Figura 8 demuestra que el dopaje con Fe reduce la banda prohibida y expande la absorción de luz en el rango visible (Tieng *et al.*, 2011). Además, el hierro es mucho más barato que los metales nobles como Pd, Pt, Ag, Au y Rh, lo que explica su uso generalizado (Yang *et al.*, 2015).

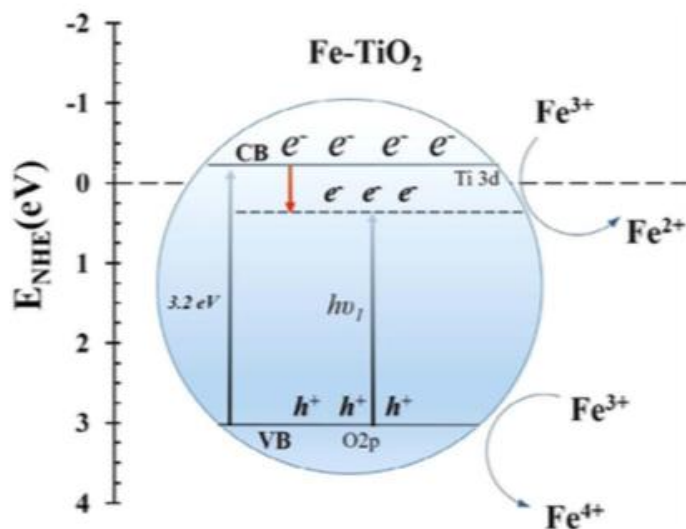
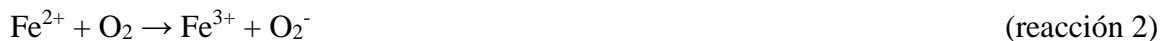
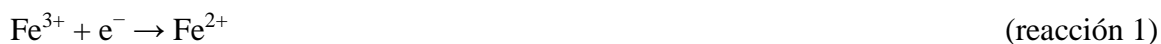


Figura 8. El nivel de energía esquemático del dopado don Fe (metal de transición) con TiO₂ (Shayegan *et al.*, 2018).

La principal razón para promover el TiO₂ dopado con Fe como catalizador es que el proceso de reducción de Fe³⁺/Fe²⁺ mejora la separación del portador de carga. Fe³⁺ acepta el electrón foto-excitado, lo transfiere a la molécula de oxígeno y, por lo tanto, produce un superóxido (Dong *et al.*, 2010). Además, el radio de Fe³⁺ (0.64 Å) y Ti⁴⁺ (0.68 Å) es similar, lo que facilita la incorporación de iones Fe³⁺ en la red cristalina de TiO₂. Como resultado, los iones Fe se distribuyen uniformemente en los intersticios de la red de TiO₂, lo que crea defectos en la estructura del TiO₂ (Hung *et al.*, 2008). Las siguientes reacciones demostraron que el Fe³⁺ funcionaría como una trampa de electrones y huecos (Yang *et al.*, 2015; Dong *et al.*, 2010):



Por lo tanto, la recombinación de los portadores de carga disminuye y aumenta la fotoactividad del TiO₂. Yang *et al.* (2015) estudiaron el TiO₂ dopado con hierro para la fotodegradación de BTEX en fibra de vidrio (GF). Los compuestos GF-Fe-TiO₂ (en diferentes proporciones Fe-a-Ti) mostraron una mayor actividad fotocatalítica para BTEX en comparación con GF-TiO₂ (como referencia) bajo irradiación de luz visible (Yang *et al.*,

2015). Tieng *et al.* (2011) informaron que los iones Fe^{3+} podrían ser sitios de captura tanto para electrones en la banda de conducción foto-generados, como para huecos en la banda de valencia.

En consecuencia, los portadores de carga foto-generados podrían separarse más fácilmente y protegerse durante más tiempo. Como resultado, la reacción redox de las especies adsorbidas se produce de forma más eficaz. La Figura 7 también muestra el efecto de diferentes concentraciones de iones Fe en la foto-degradación del tolueno como demuestra esta figura, la cantidad óptima de ion Fe es de alrededor de 0.01% en peso (Yang *et al.*, 2015; Dong *et al.*, 2010; Chun *et al.*, 2013).

Aunque se ha investigado el TiO_2 por su capacidad de oxidación hacia los COV debido a su buena actividad fotocatalítica, su utilización se limita a los rayos UV debido a su banda prohibida más amplia; además, su rápida tasa de recombinación del par electrón-hueco reduce la tasa de oxidación de los COV.

4. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, existe una gran cantidad de emisiones atmosféricas debido a las diversas actividades antropogénicas alrededor del mundo, entre los contaminantes de mayor interés se encuentran las partículas suspendidas y los BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, o-Xileno, m-Xileno y p-Xileno), los cuales generan CO_2 , CO y H_2O , que son fotorreactivos en la atmósfera porque aumentan la concentración de O_3 en la mezcla. En consecuencia, los diferentes mecanismos de reacción de estos contaminantes en la atmósfera provocan un impacto negativo en el ambiente, disminuyendo la calidad del aire respirable.

En este sentido, implementar y aplicar diferentes tratamientos de remoción físicos, químicos y fisicoquímicos, es una prioridad para eliminar este tipo de contaminantes del aire. Sin embargo, gran parte de lo reportado en la literatura con respecto a la remoción de partículas suspendidas es el uso de equipos robustos como los ciclones, para los COV generalmente se emplean materiales adsorbentes, y en casos específicos como los BTEX se reporta el uso de biofiltros, sin embargo, estos presentan desventajas de gran importancia, tales como el poco control que se tiene sobre los fenómenos de reacción y el no ser convenientes para ciertos contaminantes (como aquellos que involucran subproductos ácidos).

La propuesta del presente proyecto es la construcción de un sistema multietapa a nivel laboratorio, constituido de un reactor para adsorción con carbón activado (ACA), un reactor de tratamiento electroquímico (TEQ) empleando electrodos modificados de TiO_2/Ti y un reactor de tratamiento fotolítico (TF) para la degradación del tolueno. Este sistema multietapa propone una alternativa con ventajas sobre otros procesos, como los es un bajo costo, mejor control de variables, amplio espectro con respecto a otros contaminantes que puedan estar presentes en el aire, significando el desarrollo de un sistema compacto de alta eficiencia para la fácil adquisición e instalación.

5. HIPÓTESIS

La degradación de tolueno se podría llevar a cabo empleando un reactor multietapa integrado por una adsorción con carbón activado (ACA) para la remoción de material particulado y disminución de la concentración inicial de tolueno y otros componentes orgánicos, seguido de un tratamiento electroquímico (TEQ) empleando electrodos de $Fe_xO_x-TiO_{2,nt}|Ti$ para la degradación mediante especies activas de oxígeno, y finalizando con un tratamiento fotolítico (TF) para degradar los subproductos generados en el tratamiento electroquímico del tolueno. Con respecto a la modificación de electrodos para el proceso electroquímico, la primera hipótesis nula ($H_{1,0}$) y la primera hipótesis alternativa ($H_{1,1}$) se sugieren de la siguiente manera:

$$H_{1,0}: \eta_{Tolueno, Fe_xO_x-TiO_{2,nt}|Ti} > \eta_{Tolueno, TiO_{2,nt}|Ti}$$

$$H_{1,1}: \eta_{Tolueno, Fe_xO_x-TiO_{2,nt}|Ti} \leq \eta_{Tolueno, TiO_{2,nt}|Ti}$$

Además, el sistema multietapa significa una mejora en la eficiencia de remoción en comparación a los procesos individuales, por lo que la segunda hipótesis nula ($H_{2,0}$) y la segunda hipótesis alternativa ($H_{2,1}$) se sugieren como:

$$H_{2,0}: \eta_{Tolueno-ACA+TEQ+EQ} > \eta_{Tolueno-ACA, TEQ, TF}$$

$$H_{2,1}: \eta_{Tolueno-ACA+TEQ+EQ} \leq \eta_{Tolueno-ACA, TEQ, TF}$$

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema multietapa integrado por adsorción por carbón activado, un reactor electroquímico empleando superficies modificadas con $\text{Fe}_x\text{O}_x\text{-TiO}_{2,\text{nt}}|\text{Ti}$ y un reactor fotolítico para la remoción de Tolueno.

6.2 Objetivos específicos

6.2.1. Construir y caracterizar los electrodos modificados con $\text{Fe}_x\text{O}_x\text{-TiO}_{2,\text{nt}}|\text{Ti}$ para la remoción selectiva de tolueno.

6.2.2. Construir a nivel laboratorio el sistema multietapa integrado por un proceso de adsorción con carbón activado, un reactor electroquímico $\text{Fe}_x\text{O}_x\text{-TiO}_{2,\text{nt}}|\text{Ti}$ y un reactor fotolítico para la remoción de tolueno.

6.2.3. Evaluar la eficiencia del sistema multietapa integrado por un proceso de adsorción con carbón activado, un reactor electroquímico $\text{Fe}_x\text{O}_x\text{-TiO}_{2,\text{nt}}|\text{Ti}$ y un reactor fotolítico a nivel laboratorio para la remoción de tolueno.

7. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrollará de acuerdo con la metodología que se muestra en la Figura 9.

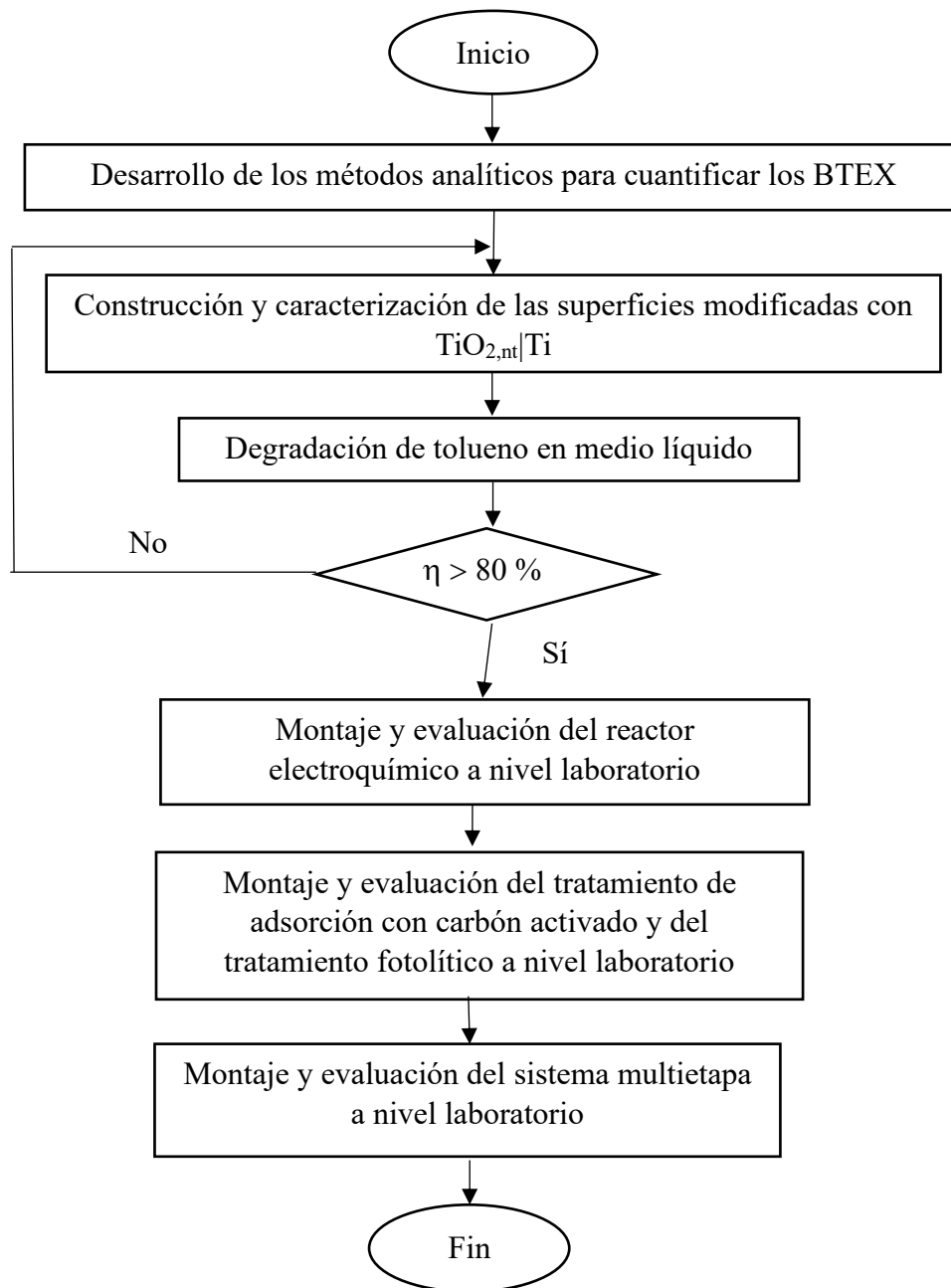


Figura 9. Metodología para desarrollar la degradación de BTEX a nivel laboratorio y piloto empleando un sistema híbrido.

Estas páginas fueron eliminadas debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021, y con el Artículo 116 de la Ley General de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021.

9. REFERENCIAS

- Abbasi, F., Pasalari, H., Delgado-Saborit, J. M., Rafiee, A., Abbasi, A., & Hoseini, M. (2020). Characterization and risk assessment of BTEX in ambient air of a Middle Eastern City. *Chemical Engineering Research & Design*, 139, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.019>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2007). Toxicological Profile for Benzene.
- Akhavan, O., & Azimirad, R. (2011). Functionalized TiO₂ nanotubes: recent advance in electrochemical energy conversion and storage systems. *Nanoscale*, 3(10), 4182-4193.
- Allam, N. K., & Grimes, C. A. (2008). Effect of cathode material on the morphology and photoelectrochemical properties of vertically oriented TiO₂ nanotube arrays. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11), 1468-1475. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.06.007>
- Ardizzone, S., Bianchi, C. L., Cappelletti, G., Naldoni, A., & Pirola, C. (2008). Photocatalytic degradation of toluene in the gas phase: relationship between surface species and catalyst features. *Environmental Science & Technology*, 42(17), 6671-6676. <https://doi.org/10.1021/es8009327>
- Aung, W. Y., Noguchi, M., Pan-Nu Yi, E. E., Thant, Z., Uchiyama, S., Win-Shwe, T. T., Kunugita, N., & Mar, O. (2019). Preliminary assessment of outdoor and indoor air quality in Yangon city, Myanmar. *Atmospheric Pollution Research*, 10(3), 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.11.011>
- Ávila-Cújar, L. C., Sotelo-Torres, B. E., & Herrera, J. A. S. (2022). Selección y comparación de las principales tecnologías para la remoción de compuestos farmacológicamente activos: una revisión. *Gestión y Ambiente*, 24(Supl3), 59-72. <https://doi.org/10.15446/ga.v24nsupl3.97265>
- Balanay, J. A. G., Floyd, E. L., & Lungu, C. T. (2014). Breakthrough curves for toluene adsorption on different types of activated carbon fibers: Application in respiratory protection. *Annals of Occupational Hygiene*. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu105>
- Barroso Martínez, J. Sh., Sandoval González, A. S., Cerro López, M., Espejel Ayala, F., Cárdenas Mijangos, J., Treviño Reséndez, J. J., Meas Vöng, Y., Manríquez Rocha, J., & Bustos Bustos, E. (2021) Electrochemical degradation of amoxicillin in acidic aqueous medium using TiO₂-based electrodes modified by oxides of transition metals. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15315-1>.

- BBC News Mundo. (2021, 10 febrero). La contaminación que causa 1 de cada 5 muertes en el mundo (y cuáles son los países de América Latina más afectados). BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56001440>
- Bellè, U., Invernizzi, M., Polvara, E., Lucotti, A., Diamanti, M. V., Sironi, S., & Pedefferri, M. (2022). A novel nanotubular TiO₂-based Plug-Flow reactor for gas phase photocatalytic degradation of toluene. *Chemical Engineering Journal*, 437, 135323. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135323>
- Cançado, L. G., Takai, K., Enoki, T., Endo, M., Kim, Y., Mizusaki, H., Jorio, A., Coelho, L. N., Magalhães-Paniago, R., & Pimenta, M. (2006). General equation for the determination of the crystallite size La of nanographite by Raman spectroscopy. *Applied Physics Letters*, 88(16), 163106.
- Castro Gonzales, A. I. (2009). Degradación de BTEX en fase gaseosa por biofiltración: aplicación en campo.
- Caudillo-Flores, U., Muñoz-Batista, M. J., Ung-Medina, F., Alonso-Núñez, G., Kubacka, A., Cortés, J. A., & Fernández-García, M. (2016). Effect of the anatase–rutile contact in gas phase toluene photodegradation quantum efficiency. *Chemical Engineering Journal*, 299, 393-402. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.090>
- Ceballos-Chuc, M., Ramos-Castillo, C., Alvarado-Gil, J. J., Oskam, G., & Rodríguez-Gattorno, G. (2018). Influence of Brookite Impurities on the Raman Spectrum of TiO₂ Anatase Nanocrystals. *Journal of Physical Chemistry C*, 122(34), 19921–19930. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b04987>
- Chang, H., & Pei, H. (2001). Thermo-Raman Spectroscopy. *Reviews in Analytical Chemistry*, 20(3). <https://doi.org/10.1515/revac.2001.20.3.207>
- Chen, C., & Peng, Y. (2022). LED-driven photocatalysis of toluene, trichloroethylene and formaldehyde by cuprous oxide modified titanate nanotube arrays. *Chemosphere*, 286, 131608. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131608>
- Chen, Y., Yuan, B., Miao, R., Wang, Y., & Zhou, S. (2019). Review on the materials and applications of photocatalytic oxidation technology for VOCs removal in indoor air. *Journal of Environmental Sciences*, 78, 271-292.

- Choudhary, R. Y., Shinde, S. S., & Sudakar, C. (2019). Recent progress in TiO₂ nanotubes: Insights into growth mechanisms, applications, and future prospects. *Applied Surface Science*, 473, 905-928.
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2017). Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Calidad del Aire Ambiente. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/4-normas-oficiales-mexicanas-nom-de-calidad-del-aire-ambiente>
- Daly, A., & Cognuck Gonzáles, S. (2021). Calidad del aire ¡Es el momento de actuar! In UNICEF.
- De Ecología Y Cambio Climático, I. N. (s. f.). Estado de la Calidad del Aire en México. [gob.mx. https://www.gob.mx/inecc/es/articulos/estado-de-la-calidad-del-aire-en-mexico?idiom=es](http://www.gob.mx/inecc/es/articulos/estado-de-la-calidad-del-aire-en-mexico?idiom=es)
- De la Rosa Fernando, A. F., & Ramírez Peñaherrera, V. E. (2012). Cuantificación de compuestos aromáticos (BTEX) en las emisiones gaseosas de fuentes móviles terrestres de gasolina en el Distrito Metropolitano de Quito.
- Dirección de Monitoreo Atmosférico. (2016). BTEX. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27Y6BhnmKkaQ==%27>
- Dong, F., Wang, H., Wu, Z., & Qiu, J. (2010). Marked enhancement of photocatalytic activity and photochemical stability of N-doped TiO₂ nanocrystals by Fe³⁺/Fe²⁺ surface modification. *Journal of Colloid and Interface Science*, 343(1), 200-208.
- El-Hashemy, M. A., & Ali, H. M. (2018). Characterization of BTEX group of VOCs and inhalation risks in indoor microenvironments at small enterprises. *Science of the Total Environment*, 645, 974–983. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.157>
- Environmental Protection Agency. (2019). Purificadores de aire. Un resumen técnico.
- Espinoza-Tofalos, A., Daghighi, M., González, M., Papacchini, M., Franzetti, A., & Seeger, M. (2018). Toluene degradation by *Cupriavidus metallidurans* CH₃₄ in nitrate-reducing conditions and in bioelectrochemical systems. *Fems Microbiology Letters*. <https://doi.org/10.1093/femsle/fny119>
- Estéves, D., Dimas-Neri, E., Casanova-Gómez, M. T., Cerón-Bretón, J. G., Cerón-Bretón, R. M., Rustrián-Portilla, E., Houbron, E., & Cima, C. (2015). Niveles de BTEX en aire ambiente y niveles de riesgo carcinogénico de benceno en un sitio urbano en el centro de Veracruz. *Asociación Mexicana De Ingeniería Ciencia Y Gestión Ambiental, A.C. Amica*, 1–8. <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/121.pdf>

- Fu, Y., & Mo, A. (2018). A review on the electrochemically self-organized Titania nanotube arrays: synthesis, modifications, and biomedical applications. *Nanoscale Research Letters*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2597-z>
- Gallego Picó, A., Gonzáles Fernández, I., & Sánchez Jimeno, B. (2012). *Contaminación Atmosférica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- García Reynoso, J. A. (2009). Influencia de la Meteorología en la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Tip Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 12(2), 83–86.
- García Zarate, M. A., Arellano García, M. E., Villada Canela, M., Santander Monsalvo, J., Rodríguez Revelo, N., Playitas, Z., Postal, C., Ciencias, B. C. M. F. De, Baja, U. A. De, Carretera, K., Ensenada, T., California, B., Investigaciones, C. P. I. De, Autónoma, U., California, D. B., Carretera, K., Ensenada, T., & California, B. (2015). Exposición a BTEX en población escolar por proximidad geográfica con gasolineras. 2º Congreso Nacional AMICA 2015, 1–6. <file:///C:/Users/Rosario/Downloads/570603dd08ae44d70ee34b57.pdf>
- Garg, A., & Gupta, N. C. (2019). A comprehensive study on spatio-temporal distribution, health risk assessment and ozone formation potential of BTEX emissions in ambient air of Delhi, India. *Science of The Total Environment*, 659, 1090-1099. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.426>
- Gholami, M., Reza Nassehinia, H., Jafari, A. J., Nasser, S., & Esrafil, A. (2014). Comparison of Benzene & Toluene removal from synthetic polluted air with use of Nano photocatalytic TiO₂/ZnO process. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 12 (45) 7363–7369. <https://doi.org/10.1039/c4ra10604k>
- Glencross, D. A., Ho, T. R., Camiña, N., Hawrylowicz, C. M., & Pfeffer, P. (2020). Air pollution and its effects on the immune system. *Free Radical Biology and Medicine*, 151, 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2020.01.179>
- Gómez, C. (2006). Evaluación de compuestos orgánicos volátiles en emplazamientos urbanos, de fondo urbano e industriales de la capv.
- González, A. S., Solis-Cortazar, J. C., Pineda-Arellano, C. A., Ramírez-Morales, E., de los Monteros, A. E., & Silva-Martínez, S. (2019) Synthesis of Ruthenium-Doped TiO₂ Nanotube Arrays for the Photocatalytic Degradation of Terasil Blue Dye. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19 (8) 5211–5219. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16823>.

- Hanaor, D., & Sorrell, C. C. (2010). Review of the anatase to rutile phase Transformation. *Journal of Materials Science*, 46(4), 855-874. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-5113-0>
- HEI, 2019. State of Global Air 2019: A Special Report on Global Exposure to Air Pollution and its Disease Burden. Health Effects Institute, Boston, MA. https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_report.pdf
- Herrada García, R. A. (2015). Construcción y evaluación de electrodos modificados de IrO₂-Ta₂O₅/Ti para la degradación electroquímica de hidrocarburos. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.
- Hong, T., Lin, W., Cui, K., Dong, Y., Li, R., Zhang, T., Zhao, Y., & Luo, L. (2021). Adsorption performance of volatile organic compounds on activated carbon fibers in a fixed bed column. *Journal of environmental chemical engineering*, 9(6), 106347. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106347>
- Iliev, M. N., Hadjiev, V. G., & Litvinchuk, A. P. (2013). Raman and Infrared Spectra of Brookite (TiO₂): Experiment and Theory. *Vibrational Spectroscopy*, 64, 148-152. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2012.08.003>
- INE-SEMARNAT (2006). Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares.
- INECC (2015). Evaluación de Compuestos Orgánicos Volátiles en la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Innovation and Qualification and Target Advisors (1979). Photoelectrocatalytic reduction of carbon dioxide in aqueous suspensions of semiconductor powders. *Nature*, 277, 637-638. <https://doi.org/10.1038/27767a0>
- Irene C. Dedoussi, Sebastian D. Eastham, Erwan Monier, Steven R. H. Barrett. (2020) Premature mortality related to United States cross-state air pollution. *Nature*. 578, 261-265.
- Jafari, A. J., Delikhoon, M., Rastani, M. J., Baghani, A. N., Sorooshian, A., Rohani-Rasaf, M., Kermani, M., Kalantary, R. R., Golbaz, S., & Golkhorshidi, F. (2021). Characteristics of gaseous and particulate air pollutants at four different urban hotspots in Tehran, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 70 (April), 102907. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102907>
- Jeong, J., Sekiguchi, K., & Sakamoto, K. (2004). Photochemical and photocatalytic degradation of gaseous toluene using short-wavelength UV irradiation with TiO₂ catalyst: comparison of three UV sources. *Chemosphere*, 57(7), 663-671. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.05.037>

- Kenneth, W. (1998). Documento de Técnicas de Control de Materia Particulada Fina Proveniente de Fuentes Estacionarias. In *Environmental Protection* (Issue 68). <https://www3.epa.gov/ttnca1/dir1/pmcontech2.pdf>
- Kikuchi, Y., Fujishima, A., & Honda, K. (2014). Toluene degradation by TiO₂ photocatalysis under weak UV irradiation: Effects of water and ethanol on reaction kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 248, 316-323.
- Koli, V. B., & Kim, J. (2019). Photocatalytic oxidation for removal of gases toluene by TiO₂-CeO₂ nanocomposites under UV light irradiation. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 94, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.01.032>
- Kowalska, E., Zaleska, A., & Sobczak, J. W. (2013). TiO₂ nanotubes with varied diameter and length: synthesis and efficiency in dye sensitized solar cells. *Journal of Nanoparticle Research*, 15(8), 1880.
- Lai, M., Zhao, J., Chen, Q., Feng, S., Bai, Y., Li, Y., & Wang, C. (2019). Photocatalytic toluene degradation over bi-decorated TiO₂: Promoted O₂ supply to catalyst's surface by metallic Bi. *Catalysis Today*, 335, 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.12.045>
- Lan, T. T. N., & Binh, N. T. T. (2012). Daily roadside BTEX concentrations in East Asia measured by the Lanwatsu, Radiello and Ultra I SKS passive samplers. *Science of the Total Environment*, 441, 248-257.
- Lee, J. H., & Kim, S. D. (2007). Effect of column length on the adsorption of volatile organic compounds onto activated carbon. *Journal of hazardous materials*, 139(2), 237-244.
- Li, W., Li, J., Chen, J., & Zhao, J. (2012). Effect of tube diameter and wall thickness of TiO₂ nanotubes on the photocatalytic degradation of methylene blue. *Journal of Hazardous Materials*, 213-214, 470-476.
- Li, X., Liu, C., Zhou, J., & Huang, F. (2015). Facile synthesis of TiO₂ nanotubes with tunable diameter for highly efficient photocatalysis. *Nanoscale Research Letters*, 10(1), 387.
- Li, Y., Zhang, X., & Li, J. (2014). Hydroxyl radical generation from TiO₂ photocatalysis in the absence of UV irradiation: A review. *Separation and purification technology*, 132, 2-10.
- Li, Z., Zhang, Y., Sun, X., Zheng, Y., Wang, X., & Cheng, X. (2020). Fe doping of TiO₂ nanotubes: Enhanced visible light photoelectrochemical performance and stability. *Journal of Colloid and Interface Science*, 575, 234-243.

- Liao, D., Li, E., Li, J., Zeng, P., & Feng, R. (2018). Removal of benzene , toluene , xylene and styrene by biotrickling filters and identification of their interactions. *PLOS ONE*, 13(1), 1–16.
- Lin, P., Nie, L., Xu, Z., Wei, W., Cheng, T., Chen, Y., & Zeng, X. (2019). One-Step and Ligand-Free modification of AU nanoparticles on highly ordered TIO₂ nanotube arrays for effective photoelectrocatalytic decontamination. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(2), 668-675. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b04911>
- Liu, Z., Zhang, X., Nishimoto, S., Jin, M., Tryk, D. A., Murakami, T., & Fujishima, A. (2007). Highly ordered TIO₂ nanotube arrays with controllable length for photoelectrocatalytic degradation of phenol. *Journal of Physical Chemistry C*, 112(1), 253-259. <https://doi.org/10.1021/jp0772732>
- Lu, C., Chu, W., & Lin, M. R. (2000). Removal of btex vapor from waste gases by a trickle bed biofilter. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 50 (3), 411–417. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464021>
- Mancera, M., Müller, T., Sarmiento, J. (2012). Inventario de emisiones contaminantes y de efecto invernadero. Zona Metropolitana del Valle de México (Vol. 3).
- Ma, W., Lu, Z., & Zhang, M. (1998). Investigation of structural transformations in nanophase titanium dioxide by Raman Spectroscopy. *Applied Physics A*, 66(6), 621-627. <https://doi.org/10.1007/s003390050723>
- Matus C., P., & Rodrigo C, L. (2002). Norma Primaria de calidad de aire. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 18 (2), 112–122. <https://doi.org/10.4067/S0717-73482002000200006>
- Mei, Q., Zhang, F., Wang, N., Yang, Y., Wu, R., & Wang, W. (2019). TiO₂/Fe₂O₃ heterostructures with enhanced photocatalytic reduction of Cr(vi) under visible light irradiation. *RSC Advances*, 9(39), 22764–22771. <https://doi.org/10.1039/c9ra03531a>
- Mo, J., Zhang, Y., Xu, Q., Lamson, J. J., & Ren, Z. H. (2009). Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: a literature review. *Atmospheric Environment*, 43(14), 2229-2246. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.034>
- Mokhtarani, B., Mafi, M., Keshavarz, M., Mortaheb, H. R., & Heidar, K. T. (2013). Biofiltration of BTEX in a Mixture Bed of Bagasse and Activated Carbon Using *Aspergillus* Fungi. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 10(2), 22–32.
- Mosaddegh, M. H., Jafarian, A., Ghasemi, A., & Mosaddegh, A. (2014). Phytoremediation of

- benzene, toluene, ethylbenzene and xylene contaminated air by *D. deremensis* and *O. microdasys* plants. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 12 (39), 1–7.
- MTA/MA-030/A92-Determinación de hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno, p-xileno, 1,2,4-trimetilbenceno) en aire - Método de adsorción en carbón activo / Cromatografía de gases., 1.
- NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, (2005).
- OMS. (2021). Contaminación del aire ambiente (exterior). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Parra, S., Oyarzún, D. P., Núñez, C., Mansilla, H. D., & Chiang, G. (2020). Toluene removal from air using a boron-doped diamond electrode: Electro-oxidation and mass transfer analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 388, 122059
- Pekey, B., & Yilmaz, H. (2011). The use of passive sampling monitor spatial trends of volatile organic compounds (VOCs) in one industrial city of Turkey. *Microchemical Journal*, 97, 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2010.09.006>
- Peng, Z., Yu, Z., Wang, L., Liu, Y., Xiang, G., Chen, Y., Sun, L., & Huang, J. (2016). Synthesis of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ nanotube and its application in photoelectrocatalytic/photoelectro-fenton decolorization of rhodamine B. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 19(1), 34–42. <https://doi.org/10.1515/jaots-2016-0104>
- Petrucci, R. H., Herring, F. G., Madura, J. D., & Bissonnette, C. (2011). *Química General: Principios y Aplicaciones Modernas*. In *Química General*.
- Programas Internacionales. (n.d.). AIRE.ORG.MX. <https://aire.org.mx/programas-internacionales/>
- Puigcerver, M., & Carrascal, M. D. (2008). *El medio atmosférico: meteorología y contaminación*. Universitat de Barcelona, 245.
- Raysoni, A. U., Stock, T. H., Samat, J. A., Chavez, M. C., Sarnat, S. E., Montoya, T., Holguin, F., & Li, W. W. (2017). Evaluation of VOC concentrations in indoor and outdoor microenvironments at near-road schools. *Environmental Pollution*, 231, 681–693.
- Regonini, D., Bowen, C. R., Jaroenworarluck, A., & Stevens, R. (2013). A review of growth mechanism, structure and crystallinity of anodized TiO_2 nanotubes, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74 (12) 377–406. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2013.10.001>.

- Rojas, B. L., & Garibay, B. V. (2003). Las partículas suspendidas , aeropartículas o aerosoles : ¿ hacen daño a la salud ?; ¿ podemos hacer algo ? *Gaceta Ecológica*, 69(octubre-diciembre), 29–44.
- Roy, P., Berger, S., & Schmuki, P. (2011). TiO₂ Nanotubes: Synthesis and Applications. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(13), 2904-2939.
- Rui, Z., Tang, M., Ji, W., Ding, J., & Ji, H. (2017). Insight into the enhanced performance of TiO₂ nanotube supported Pt Catalyst for toluene oxidation. *Catalysis Today*, 297, 159-166. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.04.055>
- Rutkowski, P., & Błaszczuk, M. K. (2019). Toluene removal from air using adsorption process onto activated carbon. *Chemical Engineering Transactions*, 74, 67-72.
- Salas, M., Zenaida, C., Julio, H., & Málaga, A. (2021). Remoción de contaminantes en aguas residuales empleando carbón activado. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/357434871_REMOCION_DE_CONTAMINANTES_EN_AGUAS_RESIDUALES_EMPLEANDO_CARBON_ACTIVADO
- Saravanan, A., Deivayanai, V., Kumar, P., Rangasamy, G., Hemavathy, R., Harshana, T., Gayathri, N., & Alagumalai, K. (2022). A Detailed Review on Advanced Oxidation Process in Treatment of Wastewater: Mechanism, challenges and Future outlook. *Chemosphere*, 308, 136524. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136524>
- Senfield, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric Chemistry, and Physics: from Air Pollution to Climate Change (2°)*. John Wiley & Sons, Inc.
- Shayegan, Z., Lee, C., & Haghghat, F. (2018). TiO₂ photocatalyst for removal of volatile organic compounds in gas phase – a review. *Chemical Engineering Journal*, 334, 2408-2439. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.153>
- Shinde, S., Bhosale, C., & Rajpure, K. (2012). Photocatalytic degradation of toluene using sprayed n-doped ZNO thin films in aqueous suspension. *Journal of Photochemistry and Photobiology B-biology*, 113, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2012.05.008>
- Shrestha, A. M., Shrestha, U. B., Sharma, R. L., Bhattarai, S., Tran, H. N. T., & Rupakheti, M. (2020). Lockdown caused by COVID-19 pandemic reduces air pollution in cities worldwide. *EarthArXiv (California Digital Library)*. <https://doi.org/10.31223/osf.io/edt4j>
- Sirés, I., Brillas, E., Oturan, M. A., Rodrigo, M. A., & Panizza, M. (2014). Electrochemical Advanced Oxidation Processes: Today and Tomorrow. A review. *Environmental Science and Pollution*

- Research, 21(14), 8336-8367. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2783-1>
- Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire. (2019a). Manual 1 Principios de Medición de la Calidad del Aire.
- Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire. (2019b). Manual 3 Redes Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire.
- SMA-GDF, INE-DGCENICA, & UAMI. (2008). Technical Report on Monitoring and Evaluation of the concentrations of volatile organic compounds in the Metropolitan Area of Mexico City.
- Sopha, H., Baudys, M., Hromadko, L., Lhotka, M., Pavliňák, D., Krýsa, J., & Macak, J. M. (2022). Scaling up anodic TiO₂ nanotube layers – influence of the nanotube layer thickness on the photocatalytic degradation of hexane and benzene. *Applied Materials Today*, 29, 101567. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101567>
- Spiegel, J., & Maystre, L. Y. (2007). Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. In Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (Vol. 4, pp. 508–512). <https://doi.org/10.1157/13109987>
- Sreekantan, S., Saharudin, K. A., & Wei, L. (2011). Formation of TiO₂ nanotubes via anodization and potential applications for photocatalysts, biomedical materials, and photoelectrochemical cell. *IOP conference series*, 21, 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/21/1/012002>
- Syamimi, N., Limi, S., Talib, M., Hafizal, H., Hamid, A., Hwai, T., Othman, M., Asma, A., Mohtar, A., Azhari, A., Dominick, D. (2022). *Urban Climate*, 45:101238. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101238>
- Titchou, F. E., Zazou, H., Afanga, H., Gaayda, J. E., Akbour, R. A., Nidheesh, P., & Hamdani, M. (2021). Removal of organic pollutants from wastewater by advanced oxidation processes and its combination with membrane processes. *Chemical Engineering and Processing*, 169, 108631. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108631>
- Tsydenova, O., Nikiforov, A., De Bie, C., & Nikiforov, V. (2018). Removal of toluene in atmospheric air by plasma-assisted electrooxidation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 518-524.
- USEPA. (2016). Technical Overview of Volatile Organic Compounds. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatileorganic-compounds>

- Verma, R. K., Gangwar, J., & Srivastava, A. K. (2017). Multiphase TiO₂ nanostructures: A review of efficient synthesis, growth mechanism, probing capabilities, and applications in bio-safety and health. *RSC Advances*, 7(70), 44199-44224. <https://doi.org/10.1039/c7ra06925a>
- Wang, X., Pan, H., Sun, M., & Zhang, Y. (2022). Au single atom-anchored WO₃/TiO₂ nanotubes for the photocatalytic degradation of volatile organic compounds. *Journal of Materials Chemistry A*, 10(11), 6078-6085. <https://doi.org/10.1039/d1ta08143h>
- Wang, Y., Jiang, S., Liu, F., Zhao, C., Zhao, D., & Li, X. (2019). Study on preparation and toluene Removal of B1O1/B12WO6/ACF Photocatalyst. *Applied Surface Science*, 488, 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.228>
- Wayman, W. N., & Woodward, J. J. (2017). Exposure to the abused inhalant toluene alters medial prefrontal cortex physiology. *Neuropsychopharmacology*, 43(4), 912-924. <https://doi.org/10.1038/npp.2017.117>
- Wöhrnschimmel, H., Zuk, M., Martínez-Villa, G., Cerón, J., Cárdenas, B., Rojas Bracho, L., & Fernández Bremauntz, A. (2008). The impact a bus rapid transit system on commuters' exposure to benzene, CO, PM2.5 and PM10 in Mexico City. *Atmosphere*, 42. <https://doi.org/8194-8203>
- Zhang, L., Wang, J., Li, Z., & Zhang, Y. (2019). Degradation of toluene in gas phase by a TiO₂ electrochemical oxidation process. *Journal of environmental sciences*, 79, 1-8.
- Zhang, M., Chen, X., & Chen, J. (2016). Photocatalytic degradation of toluene in air using a novel nanocomposite of TiO₂ and SiO₂. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(3), 3143-3150.
- Zhang, S., You, J., Chen, H., Ye, J., Cheng, Z., & Chen, J. (2020). Gaseous toluene, ethylbenzene, and xylene mixture removal in a microbial fuel cell: performance, biofilm characteristics, and mechanisms. *Chemical Engineering Journal*, 386, 123916. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123916>
- Zhang, Y., Li, Y., Li, X., Li, H., Li, J., & Zhang, J. (2018). Photocatalytic performance of Fe-doped TiO₂ nanotubes and the underlying mechanism. *Journal of Alloys and Compounds*, 738, 403-412.
- Zhao, Q., Li, Y., Chai, X., Xu, L., Zhang, L., Ning, P., Huang, J., & Tian, S. (2019). Interaction of inhalable volatile organic compounds and pulmonary surfactant: Potential hazards of VOCs exposure to lung. *Journal of Hazardous Materials*, 369, 512-520. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.104>

- Zhu, B., Zhang, L., Li, M., Yan, Y., & Zhang, X. (2020). High-performance of plasma-catalysis hybrid system for toluene removal in air using supported AU nanocatalysts. *Chemical Engineering Journal*, 381, 122599. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122599>
- Zhu, L., Shen, D., & Luo, K. (2020). A critical review on VOCs adsorption by different porous materials: Species, mechanisms and modification methods. *Journal of Hazardous Materials*, 389, 122102. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122102>
- Zhu, Y., Jin, K., Li, H., Qian, H., Wang, H., & Zhao, L. (2018). A novel anode with anticorrosive coating for efficient degradation of toluene. *Chemical Engineering Journal*, 334, 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.048>

10. ANEXOS

Anexo 1. Método cromatográfico GC-BID

Tasa de calentamiento (°C/min)	Temperatura (°C)	Tiempo de espera (min)
	30	3
10	50	2
5	60	2
5	70	2

Datos adicionales:

Longitud de la columna	30 m
Diámetro interno	0.25 mm
Flujo de la columna	0.60 mL/min
Velocidad linear	14.8 cm/s
Flujo total	15.5 mL/min

Anexo 2. Método cromatográfico GC-MS

Tasa de calentamiento (°C/min)	Temperatura (°C)	Tiempo de espera (min)
	40	4
3	250	5