



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Catalizadores funcionales como método de tratamiento en la
ozonización catalítica de los compuestos orgánicos volátiles (COV):
Revisión sistemática**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTORES:

Huaman Coaquira, Americo (ORCID: 0000-0002-0694-3558)
Esquivel Mendoza, Fray Herbie (ORCID: 0000-0002-2294-0090)

ASESOR:

Dr. Lozano Sulca, Yimi Tom (ORCID: 0000-0002-0803-1261)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2022

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a Dios quien ha sido nuestro guía, fortaleza en estos tiempos difíciles que hemos pasado en esta la pandemia y a nuestros padres quien siempre estuvieron para apoyarnos y no dejarnos rendir.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Dios por darnos buena salud y cuidarnos siempre. Agradecer a nuestros padres por su apoyo durante esta etapa. También agradecer a la Dr. Lozano Sulca, Yimi Tom por el apoyo durante el periodo de la elaboración de tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula	ii
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice de contenido	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de figuras	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	15
3.1. Tipo y diseño de investigación	15
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización	15
3.3. Escenario de estudio	15
3.4. Participantes	16
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	16
3.6. Procedimiento	16
3.7. Rigor científico	18
3.8. Método de análisis de información	19
3.9. Aspectos éticos.....	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
V. CONCLUSIONES	28
VI. RECOMENDACIONES.....	29
REFERENCIAS	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Clasificación de los COV de acuerdo a su estructura</i>	5
<i>Tabla 2. Propiedades físicas, químicas y termodinámicas de los COV comunes</i>	6
<i>Tabla 3. catalizadores funcionales usados en la ozonización catalítica de los diferentes COVs</i>	20
<i>Tabla 4. temperatura de reacción en la que ocurre el método de tratamiento de la ozonización catalítica</i>	23

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Aplicaciones del ozono en la protección del medio ambiente</i> -----	9
<i>Figura 2. Proceso de generación de ozono mediante descarga de barrera</i> -----	9
Figura 3. Procedimiento de selección de artículos_____	18
<i>Figura 4. catalizadores funcionales más usados</i> _____	22
<i>Figura 5. eficiencia del uso de catalizadores funcionales como método de tratamiento en la ozonización catalítica de diferentes COVs</i> _____	25

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo analizar cuáles son los aspectos más relevantes de la ozonización catalítica de diferentes COVs, para lo cual presentó una metodología de tipo aplicada con un diseño narrativo; para lo cual se utilizó el método de análisis documental.

Mediante los resultados se obtuvo que, los catalizadores funcionales son los óxidos de metales de transición como el Mn, Co, Cu, Fe y Ni; ello debido a que los óxidos de metales de transición soportados son eficaces para la ozonización catalítica del tolueno en comparación con los materiales meso porosos a granel. La temperatura de reacción en la que ocurre el método de ozonización catalítica se da entre los 25 °C hasta los 90 °C; además, se pudo comprobar que el óxido de manganeso soportado es uno de los catalizadores más activos para la ozonización catalítica del tolueno a baja temperatura. La eficiencia del uso de catalizadores funcionales es alta debido al porcentaje de conversión presentado que varían del 90 al 100%. Por otro lado, el tolueno es el COV más predominante; así también se tiene que, el tolueno es el COV que presenta una más rápida oxidación en la mayoría de los estudios.

Palabras clave: Catalizadores, ozonización, catalítica, compuestos orgánicos volátiles, métodos

Abstract

The objective of this study was to analyze the most relevant aspects of the catalytic ozonation of different VOCs, for which it presented an applied methodology with a narrative design, using the documentary analysis method.

Through the results it was obtained that, the functional catalysts are transition metal oxides such as Mn, Co, Cu, Fe and Ni; this is due to the fact that supported transition metal oxides are effective for the catalytic ozonation of toluene in comparison with bulk mesoporous materials. The reaction temperature at which the catalytic ozonation method occurs is between 25 °C to 90 °C; furthermore, it was found that supported manganese oxide is one of the most active catalysts for catalytic ozonation of toluene at low temperature. The efficiency of the use of functional catalysts is high due to the conversion percentage presented, which varies from 90 to 100%. On the other hand, toluene is the most predominant VOC; thus, toluene is the VOC that presents the fastest oxidation in most of the studies.

Keywords: Catalysts, ozonation, catalytic, volatile organic compounds, methods.

I. INTRODUCCIÓN

En el siglo XXI los problemas ambientales han tomado revuelo y preocupación en la sociedad, los contaminantes del aire como los compuestos orgánicos volátiles (COV) es uno de los tantos factores existentes perjudiciales para el medioambiente (Li X. et al., 2020, p.1).

En las últimas décadas, la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) de las industrias y el transporte ha aumentado enormemente, lo que es muy perjudicial para todo el ecosistema (Wojtyla S. et al., 2020, p.1). Se informa que las emisiones antropogénicas de COVs no metánicos en China aumentaron dramáticamente un 192%, de 9,76 Tg en 1990 a 28,5 Tg en 2017 (Li et al., 2019, p.1).

En el mundo una de las ciudades con el aire más contaminado es China, a causa de su industrialización tiene consecuencias como el smog fotoquímico y la neblina por tener ozono (O₃) y partículas finas (PM) en altos niveles, rompiendo los altos niveles de estándares de calidad del aire (Guo et al. 2017, p.1022).

Estos compuestos orgánicos volátiles están compuestos por una variedad de especies que son emitidas a través de procesos biogénicos y antropogénicos que van directamente a la atmosfera (Cui J. et al., 2020, p.1). Las principales fuentes antropogénicas de emisiones de COV incluyen los gases de escape de los vehículos, la evaporación de combustibles, los procesos industriales, los productos domésticos y uso de solventes (Guo et al., 2011).

Los COV se encuentran de dos formas: se encuentran diferentes actividades naturales que pueden contaminar (biogénicos) como también las antropogénicas estas son denominadas como las que causan mayor impacto contaminante sobre el medioambiente (Vickers N. et al., 2017, p.1). Las plantas como contaminantes biogénicos emiten en grandes cantidades COV, monoterpenos, sesquiterpenos isopreno (2-metil-1,3-butadieno) y compuestos orgánicos oxigenados (da Silva et al., 2016, p.1245).

Como consecuencia de los contaminantes antropogénicos que vienen principalmente de las industrias como las de madera, siderúrgica, farmacéutica, la quema de combustible, quema de biomasa y fósiles causan efectos adversos de gran

impacto negativo en el aire, donde países industrializados (95% en el hemisferio norte) son causantes de emisiones antropogénicas (Bedia C. et al., 2018, p.2).

Además, debido al alto índice de acumulación de O₃ y PM y en consecuencia por la combinación de los compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_x) se generan efectos que perjudican la calidad del aire, el cambio climático, la ecología, la salud humana y la visibilidad (Guo et al. 2017, p.1022).

Donde, además la normativa aplicada por Estados Unidos encontró 189 compuestos orgánicos volátiles (COV) calificados altamente peligrosos para la salud (Zhang V. et al., 2017, p.1).

Ante ello, la ozonización catalítica se considera uno de los métodos más factibles y efectivos para la eliminación de COV (Yadav S. et al., 2020, p.205). Siendo así que, en la última década, los investigadores han revisado la ozonización catalítica como un proceso eficaz utilizado para la eliminación de compuestos orgánicos del agua y agua residuales (Wang J. et al., 2019, p.1). Siendo los catalizadores funcionales utilizado en muchas reacciones de transformación, incluida la valorización de biomasa en productos químicos y biocombustibles de valor agregado (Sagar T. y Abhishek B., 2020, p.1).

¿Cuáles son los aspectos más relevantes de la ozonación catalítica de diferentes COVs? y como problemas específicos se busca resolver las siguientes preguntas:

PE1: ¿Cuáles son los catalizadores funcionales usados en la ozonación catalítica de los diferentes COVs?

PE2: ¿Cuál es la temperatura de reacción en la que ocurre el método de tratamiento de la ozonación catalítica de los diferentes COVs?

PE3: ¿Cuál es la eficiencia del uso de catalizadores funcionales como método de tratamiento en la ozonización catalítica de diferentes COVs?

Además, se planteó el objetivo de estudio de la siguiente forma: Analizar cuáles son los aspectos más relevantes de la ozonización catalítica de diferentes COVs; y se elaboraron también los objetivos específicos de la siguiente manera:

OE1: Clasificar cuáles son los catalizadores funcionales usados en la ozonización catalítica de los diferentes COVs

OE2: Determinar cuál es la temperatura de reacción en la que ocurre el método de tratamiento de la ozonización catalítica de los diferentes COVs

OE3: Identificar la eficiencia del uso de catalizadores funcionales como método de tratamiento en la ozonización catalítica de diferentes COVs

Este estudio presenta una justificación teórica, ya que se recolecta y se analiza estudios actualizados de diferentes investigadores, con una antigüedad mínima, sobre los catalizadores funcionales como método de tratamiento en la ozonización catalítica de los compuestos orgánicos volátiles; buscando dar a conocer a futuros investigadores y público en general, involucrados con el tratamiento en la ozonización.

II. MARCO TEÓRICO

La capacidad aparentemente ilimitada de la industria química ha creado una amplia gama de compuestos nuevos y a veces exóticos, donde las aplicaciones de los productos, en constante expansión, van acompañadas de vertidos aparentemente inevitables (Yan Hailong y Zhou Yi Ge., 2021, p.2). Ante ello, la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) es uno de los principales contribuyentes a la contaminación del aire, clasificándose como principal contribuyente a la contaminación atmosférica (Alvarez Juan et al., 2020, p.1).

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) se emiten a nuestro entorno a partir de diversas fuentes industriales y naturales, y la contaminación formada es la preocupación común de todas las personas (Rojas S. y Horcajada P., 2020, p.1).

La mayoría de los COV son tóxicos u olorosos, y pueden provocar graves reacciones fotoquímicas junto con otros contaminantes atmosféricos (por ejemplo, O₃, NO_x, SO_x) (Limmer N. y Burken J., 2016, p.2).

Influenciada por cierta actividad climática, una contaminación atmosférica a escala local puede probablemente evolucionar hacia una contaminación regional a escala, que es más difícil de tratar (Salthammer T., 2016, p.3).

Además, los COV contribuyen tanto de forma indirecta como precursores del ozono/smog como de forma directa como sustancias tóxicas para el medio ambiente y la rápida urbanización e industrialización contribuyen al aumento de las emisiones de COV en el medio ambiente (Montero M. et al., 2018, p.3). Siendo así que la mayoría de los países han impuesto condiciones estrictas para limitar los COV en el medio ambiente (Moura Leila et al., 2017, p.5).

Pero, las emisiones de COV pueden proceder de una amplia gama de fuentes exteriores e interiores, como las fuentes exteriores incluyen, entre otras, las industrias químicas, la producción de papel, el procesamiento de alimentos (He Chi et al., 2019, p.2). El secado de pinturas, el transporte, las refinerías de petróleo, los fabricantes de automóviles, el desengrasado de metales, los fabricantes de textiles, las plantas de componentes electrónicos, los disolventes y los productos de limpieza (Kamal Muhammad S. et al., 2016, p.1).

Las fuentes interiores incluyen productos domésticos, suministros de oficina, impresoras, sistemas de intercambiadores de calor, materiales aislantes, maderas prensadas, estufas de madera y fugas de tuberías estufas de leña y fugas en las tuberías (Zhang Zhixiang et al., 2016, p.3).

Los líquidos correctores y el papel autocopiativo, los materiales gráficos y de artesanía, incluidos los pegamentos y adhesivos, los rotuladores permanentes y las soluciones fotográficas, también contienen cierta cantidad de COV (Morin Julie et al., 2019, p.2).

Estos son compuestos orgánicos de bajo peso molecular que se evaporan fácilmente a temperatura ambiente y su uso es con frecuencia para disolver, diluir o dispersar materiales que son insolubles en agua y se encuentran clasificados según su estructura molecular o grupo funcional (Wojtyla S. et al., 2020, p.5). Ver Tabla 1.

Tabla N°1. Clasificación de los COV de acuerdo a su estructura

Tipo de estructura	Funcionalidad	Clasificación por funcionalidad
Hidrocarburos alifáticos	Pertencientes a la fracción más abundante en el petróleo crudo, (muchos de los cuales son clorados, halocarbonos). Alcanos, alquenos y alquinos	Se clasifican según su peso molecular en cuatro grupos: (1) alcanos gaseosos, (2) alcanos de bajo peso molecular (C 8 -C 16), (3) alcanos de peso molecular medio (C 17 -C 28), y (4) alcanos de alto peso molecular (>C 28).-alcanos, isoalcanos, cicloalcanos (naftenos), terpenos y esteranos (Macaya C. et al., 2019, p.2).
Hidrocarburos aromáticos	Alcoholes, éteres, ésteres, aldehídos , etc.	Aminas, amidas, nitrilos

Elaboración propia

Así también, los compuestos orgánicos volátiles (COV) son aquellos compuestos orgánicos con una presión de vapor superior a 10,3 Pa a temperatura (293,15 K) y presión (101,325 kPa) normales (Silva José Avelino et al., 2016, p.3).

Además, conforman un gran grupo de sustancias químicas basadas en el carbono que se evaporan fácilmente a temperatura ambiente. Ver Tabla N°2.

Tabla N°2. Propiedades físicas, químicas y termodinámicas de los COV comunes

Compuesto	Formula	Cp (J/mol C)	B.P. (C)	ΔG_f (kj /mol)	ΔH_f (kj /mol)	ΔH_c (kj/ mol) 25°C
Tolueno	C7H8	166.0	110.6	114.09	12.0	-3909.8
Propano	C3H8	73.8	-42	-23.4	-103.8	-2220.0
Benceno	C6H6	136.1	80.1	124.5	49.0	-3267.6
Etilbenceno	C8H10	185.9	136	120.0	-12.5	-4564.7
o-Xileno	C8H10	188.8	144	110.8	-24.4	-4552.8
Acetileno	C2H2	44.1	-84	209.2	226.7	-1299.6
Acetona	C3H6O	125.0	56	-155.3	-248.1	-1789.9
Formaldehído	CH2O	35.4	-19	-109.9	-115.9	-563.4
n-Hexano	C6H14	195.0	68	-4.0	-198.8	-4163.1
Dicolorometano	CH2Cl2	50.8	39.6	-68.9	-95.5	-583.8
Tricolorometano	CHCl3	65.8	61.2	-68.5	-101.3	-435.2
Tetracolorometano	CCl4	133.9	76.72	-62.5	-132.8	-260.7
Tricoloroetileno	C2HCl3	80.02	87.2	6.7	-19.1	-910.8
Tetracoloroetileno	C2Cl4	95.6	121.1	20.6	-14.2	-772.8
Acetaldehído	C2 H4 O	53.7	20.2	-133.2	-166.4	-1192.3
Etileno	C2 H4	42.9	-103.7	68.4	52.5	-1411.1

Fuente: Modificado de Kamal M. et al., (2016)

De acuerdo con la Tabla 2 se puede enumerar también las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de los COV más comunes.

Además, los COV son compuestos orgánicos que tienen una alta presión de vapor a temperaturas normales, incluidos los saturados ligeros y los aromáticos, como el benceno, el tolueno, el etilbenceno y el xileno (BTEX), el pentano, el hexano y otros compuestos bencénicos sustituidos más ligeros, que pueden constituir un pequeño porcentaje de la masa total de algunos aceites crudos (Liu Mengdi et al., 2021, p.3).

Cada año se producen y utilizan miles de millones de libras de estos COV y hay cientos de COV diferentes utilizados en la actualidad (Vinod V. et al., 2017, p.2). Los COV se utilizan ampliamente como ingredientes de productos domésticos, como pinturas, decapantes, barnices, cera, productos de limpieza, desinfectantes,

cosméticos, desengrasantes, aerosoles, limpiadores, repelentes de polillas, ambientadores y productos para el automóvil (Chen Ji. Et al., 2019, p.4).

Sólo en unos pocos casos los COV no se liberan en el medio ambiente; pero en la mayoría de los casos se vierten en los sistemas acuáticos, se evaporan en el aire o se vierten en el suelo generando grandes contaminaciones (Qi dianpeng et al., 2020, p.3).

En el caso de los medios hídricos el agua potable es una fuente común de exposición a los disolventes debido a los vertidos de las industrias y al uso doméstico y a la presencia de subproductos de la desinfección, como el cloroformo (CHCl₃), etc. (Bagheri H. et al., 2017, p.5).

Además de los vertidos "habituales" (resultado final de procesos químicos o físicos mal controlados), los vertidos accidentales (por ejemplo, las emisiones incontroladas de plantas industriales o los naufragios de petroleros en el mar) contribuyen a aumentar los niveles de una amplia gama de compuestos (Azzouz I. et al., 2018, p.3).

Pero también, en el caso del agua, la presencia de COV en las aguas subterráneas representa una preocupación medioambiental y de salud pública porque muchos de estos compuestos pueden tener un efecto adverso en la salud humana (Kujawa J. et al., 2016, p.5).

Así también, en el caso de los suelos, estos COV pueden liberarse y migrar a la fase gaseosa del suelo por advección y difusión o disiparse por volatilización y solubilización (Zimmermann J. et al., 2021, p.2).

Esto ocurre no sólo cerca de las zonas industriales y urbanas, sino también en zonas remotas como la estratosfera del Ártico, donde los compuestos orgánicos estables se encuentran en concentraciones elevadas (Zhou Menglian et al., 2016, p.2).

Ante ello, los compuestos orgánicos volátiles (COV) como gases reactivos han recibido mucha atención debido a su importante papel en la química atmosférica y los efectos adversos para la salud (Lim Y. et al., 2017, p.2).

Siendo así que la presencia de COV en el ambiente interior también supone una amenaza para la salud pública, donde la exposición del medio ambiente y de los

organismos vivos a los COV ha alterado el delicado equilibrio de los ecosistemas y ha provocado efectos adversos para la salud (Yao Minwei et al., 2018, p.1).

La relación entre estos efectos sobre la salud y la exposición a los COV se reconoció por primera vez en la industria química, donde existían altas concentraciones de un número limitado de compuestos (Lu Rui et al., 2016, p.2). Además, las investigaciones toxicológicas revelaron que muchos COV tienen diversos efectos reversibles e irreversibles en el cuerpo humano, que van desde la anestesia aguda hasta los efectos a largo plazo, como la inducción de carcinomas (Guo Xuecheng et al., 2021, p.3).

Como se sabe los COV comprenden un grupo importante de sustancias químicas que se evaporan fácilmente a temperatura ambiente y suelen estar presentes en el aire interior; pero algunos de ellos pueden causar efectos adversos para la salud a corto y largo plazo (Lannoy Anthony et al., 2016, p.6). Demostrándose así que algunos COV inducen cáncer en animales, y se sospecha o se sabe que algunos de ellos causan cáncer en humanos, incluso en concentraciones muy bajas (Alimohammadi M. y Naderi M., 2021, p.2).

Los signos o síntomas clave asociados con la exposición a los COV incluyen irritación de los ojos, molestias en la nariz y la garganta, dolor de cabeza, reacción alérgica en la piel, náuseas, fatiga o mareos (Engelsman M. et al., 2020, p.2). Es así que, la presencia de COV en el medio ambiente es un fenómeno de interés científico, por la gama de efectos adversos que se sabe, o se sospecha, que están asociados a ellos; ya que, además, la cantidad anual de emisiones de COVs casi se ha acercado a la de NOx o SO2 (Ueta Lkuo et al., 2016, p.1).

Para hacer frente a esta grave situación, en los últimos años se han promulgado reglamentos cada vez más estrictos y se requieren tecnologías más eficaces para la eliminación de los COV (Shu Yajie et al., 2018, p.2).

Ante ello, los catalizadores de baja temperatura con metales nobles y óxidos metálicos ofrecen la posibilidad de producir de forma rápida y selectiva los productos químicos deseados (CO₂ y H₂O) en condiciones relativamente suaves (Chang Tian et al., 2019, p.3).

Adicionalmente, la excelente capacidad de oxidación del ozono permite su amplia aplicación en el campo de la esterilización y la desinfección, así como en la eliminación de contaminantes. Como se observa en la Figura 1.

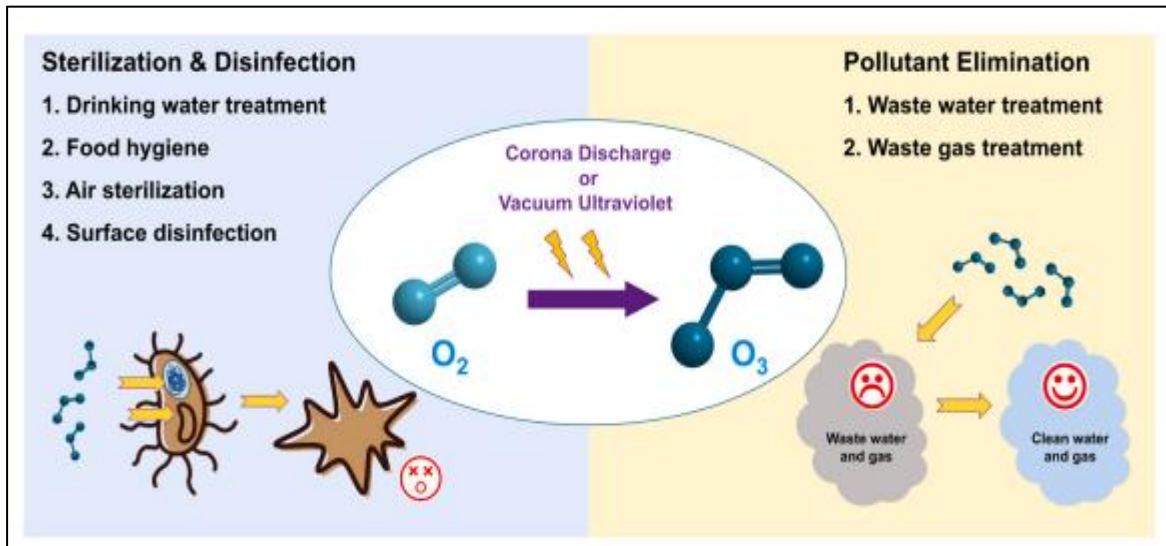


Figura N°1. Aplicaciones del ozono en la protección del medio ambiente

Fuente: He Xianjun et al., (2022)

El ozono (O_3) es un gas que se encuentra de forma natural en la atmósfera, es un fuerte agente oxidante y un potente microbicida de amplio espectro que es activo contra bacterias, hongos, virus y esporas bacterianas y fúngicas (Botondi Rinaldo et al., 2016, p.1). En la actualidad, el ozono se genera comúnmente mediante el paso de aire, o gas oxígeno a través de una descarga eléctrica de alto voltaje (Deng Li Zhen et al., 2020, p.4).

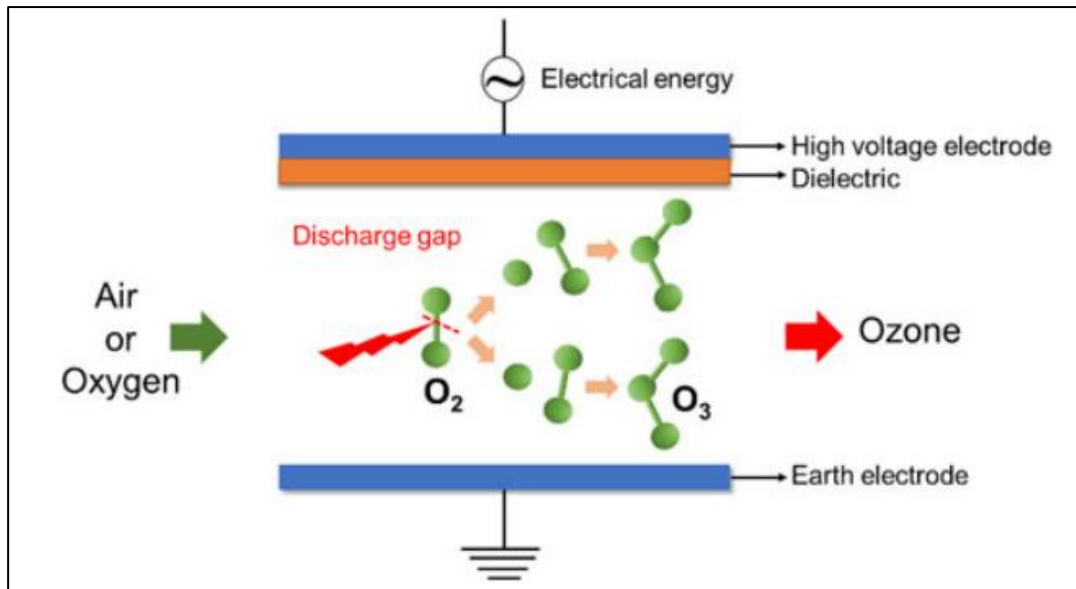


Figura N°2. Proceso de generación de ozono mediante descarga de barrera dieléctrica

Fuente: Li Rong et al., (2022)

Como se muestra en la figura 2 el aire o el oxígeno fluye a través de la brecha entre dos electrodos separados por un dieléctrico material, una descarga de alta energía divide el oxígeno molecular en radicales atómicos de oxígeno, que se combinan espontáneamente con el oxígeno molecular para formar moléculas de ozono.

Y entre las múltiples aplicaciones el ozono se encuentra la eliminación de contaminantes; en este sentido, el ozono ha demostrado su eficacia en el tratamiento de aguas residuales, incluyendo la eliminación de iones de hierro y manganeso, la eliminación del color, la degradación de pesticidas y la degradación de productos farmacéuticos (Zhong L. y Haghghat F., 2016, p.3). En el tratamiento de aguas residuales, los contaminantes se oxidan a través de una reacción directa con el ozono molecular o de reacciones indirectas con el radical hidroxilo formado a partir del ozono (Ryu Hae Won et al., 2019, p.3).

La reacción directa entre el ozono y los contaminantes incluye reacciones de oxidación-reducción, reacciones de cicloadición dipolar y reacciones de sustitución electrofílica. Por lo tanto, el ozono puede reaccionar selectivamente con contaminantes orgánicos que contienen enlaces C-C, ciertos grupos funcionales (por ejemplo, OH, CH₃, OCH₃) y aniones (los de N, P, O, S).

Así también, el ozono se ha aplicado en la eliminación de contaminantes gaseosos como los COV; donde, Se ha informado de que el ozono reacciona directamente con los alquenos para formar compuestos de ozónido en un medio homogéneo, que posteriormente se convierten en alcoholes cetonas y ácidos carboxílicos (Shayegan Z. et al., 2019, p.1).

Por el contrario, el ozono muestra una baja actividad hacia los alcanos (por ejemplo, metano, etano y propano), los aldehídos (por ejemplo, formaldehído, acetaldehído y glioxal) y aromáticos (por ejemplo, benceno, tolueno, etc.) (Tian Mingze et al., 2020, p.1). Pero, con la ayuda de catalizadores, el ozono acelera enormemente la degradación de alcanos, aldehídos y aromáticos (Liu Shuilian et al., 2018, p.2).

Por lo tanto, la oxidación catalítica con ozono (ozonización catalítica) presenta una alternativa prometedora para la eliminación de COV gaseosos (Yu Yi et al., 2020, p.1). De ahí es que la ozonización catalítica de COVs se considera una reacción heterogénea que se produce en la superficie del catalizador (Ji Jian et al., 2019, p.3).

El oxígeno atómico y las especies superficiales de oxígeno se conocen generalmente como las principales especies activas en la ozonización catalítica de los COV y algunas investigaciones indicaron que las moléculas de oxígeno también participan en esta reacción en el término de reacción de autooxidación (Brodowska A. et al., 2018, p.4).

Se presenta a continuación una clasificación de los antecedentes recolectados:

Tiene como objetivo principal del trabajo determinar la demanda de ozono necesaria para la mineralización total del tolueno en el rango de temperatura de 40 a 100 °C elegido para minimizar el envenenamiento del catalizador por agua. Los resultados muestran que era posible la mineralización completa del tolueno si se mantenía una proporción suficiente de ozono/tolueno en el gas suministrado al reactor. Para proporciones molares de ozono/toluenos inferiores a 20, la extensión de la mineralización de tolueno aumentó con la temperatura hasta una meseta a partir de aproximadamente 60 °C, lo que fue causado por la escasez de ozono. Concluyendo que el mecanismo implica la formación de radicales •OH, lo que puede explicar la eficacia de Co(II)/SiO₂ catalizador en combinación con ozono para la oxidación de tolueno y otros COV aromáticos en un proceso a baja temperatura (Machniewski P. et al., 2021, p.1).

en su artículo reporta el comportamiento de los óxidos metálicos Ce, Cu, Co, Ag y Mn soportados en zeolita 13X frente a la oxidación catalítica con ozono (OZCO) del tolueno y la influencia de la humedad en el proceso de descomposición. El método de impregnación simple se adaptó para dispersar los óxidos metálicos y se encontró altamente activo para la oxidación del tolueno en presencia de ozono. Los resultados muestran que, el grado de descomposición del ozono es responsable del grado de descomposición oxidativa de tolueno sobre el catalizador Mn/13X. La adición de humedad (Humedad relativa del 25 %) a la mezcla de reacción mejoró considerablemente la conversión de tolueno y la selectividad a los óxidos de carbono del 49 % al 61 % y del 38 % al 53 % respectivamente, en el catalizador Mn/13X. Concluyendo que, a temperatura programada y oxidación a temperatura programada, la adición de humedad disminuyó la acumulación de subproductos, redujo la desactivación del catalizador y mejoró la oxidación prolongada del tolueno en la zeolita Mn/13X (Gopi T. et al.,2019, p.1).

En su trabajo, se prepararon una serie de δ -MnO₂ /USY con diferentes contenidos de δ -MnO₂ (0,3 % en peso, 1,5 % en peso, 3,0 % en peso, 10,0 % en peso y 15,0 % en peso); además, se investigaron sus actuaciones de adsorción de tolueno, degradación y mineralización de tolueno y eliminación de ozono (O₃). Los resultados mostraron que, entre todas las muestras, 3,0% en peso de δ -MnO₂ /USY mostró el mejor rendimiento de adsorción, degradación y mineralización de tolueno y de acuerdo con los análisis DRIFTS y GC-MS in situ, se determinaron los subproductos intermedios durante el progreso de la degradación del tolueno y la posible ruta de oxidación catalítica del tolueno por δ -MnO₂/USY en presencia de O₃ fue propuesto (Yang Rujie et al.,2020, p.1).

En su trabajo científico, se utilizó un método combinado de vapor y ácido nítrico para controlar la desaluminización de la zeolita Y, y luego se cargó óxido de manganeso en la zeolita Y mediante el método de impregnación. Se encontró que el MnOx estaba muy disperso en la zeolita de desaluminación, y los oxígenos adsorbidos se activaban más fácilmente en las vacantes de oxígeno activo. El MnOx soportada sobre la zeolita Y desaluminada mostró un mejor efecto catalítico que la soportada sobre la matriz Y. A baja humedad (0,8%) a 30 °C, la eficiencia de degradación del tolueno alcanzó más del 94% usando el catalizador con desaluminación suave. Concluyendo que los productos intermedios y los subproductos de la reacción habían cambiado en diferentes condiciones de humedad (Shao Qi et al., 2021, p.1).

Presentó como objetivo principal sintetizar el catalizador $\text{MnO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}$ por el proceso de poliol y evaluado en ozonización catalítica de tolueno en aire a temperatura ambiente. Los efectos de la temperatura y el tiempo de síntesis de polioles se optimizaron utilizando la metodología de superficie de respuesta. En la metodología, el rendimiento del catalizador de poliol optimizado se comparó con un catalizador preparado por el método de impregnación ($\text{MnO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-I}$). El catalizador de poliol tuvo conversiones de tolueno y ozono más altas con menos deposición de carbono y una mayor selectividad hacia el CO_2 en el producto que el catalizador impregnado. Casi el 80 % del tolueno se eliminó usando $\text{MnO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}$ a los 120 min de reacción, superior al $\text{MnO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-I}$ (70%). Concluyendo que la mayor actividad del catalizador de poliol se atribuye a un tamaño de partícula de manganeso más pequeño, una mayor área de superficie del catalizador y un estado de oxidación más bajo del manganeso (Ghavami M. et al., 2021, p.1).

En su artículo, se sintetizaron tres tipos de catalizadores basados en Mn sobre $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, SiO_2 y TiO_2 para evaluar la degradación catalítica de tolueno por ozono en las condiciones industriales relacionadas (es decir, temperatura, adición de SO_2 y vapor de agua). Los resultados muestran que el ácido total y el contenido de Mn^{3+} en la superficie del catalizador tienen una correlación positiva con la actividad catalítica, por lo que el MnO_x soportado en $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ logra la conversión de tolueno y la eficiencia de descomposición del ozono más altas. Se concluyó que el envenenamiento del catalizador ocurrió cuando se agregó SO_2 o vapor de agua, pero afortunadamente, la eficiencia de conversión de tolueno pudo recuperarse una vez que se detuvo el SO_2 o el vapor de agua (Shao Jiaming et al., 2020, p.1).

En su estudio, la oxidación catalítica de tolueno con ozono a temperatura ambiente se llevó a cabo sobre catalizadores mesoporosos ordenados jerárquicamente (CeO_2 (meso), Mn_2O_3 (meso), ZrO_2 (meso) y $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (meso)) y Al_2O_3 con varias propiedades texturales y fases ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (meso), $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (13 nm) y $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) para examinar los efectos de la naturaleza del catalizador sobre la actividad catalítica. Los catalizadores se caracterizaron por N_2 -Medidas de fisisorción, difracción de rayos X en polvo, reducción por temperatura programada, espectroscopia fotoelectrónica de rayos X y microscopía electrónica de transmisión de barrido con espectroscopia de energía dispersiva. Entre los catalizadores mesoporosos ordenados, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (meso) tuvo la mayor eficiencia de eliminación de tolueno debido a su mayor área de superficie y volumen de poro, que a su vez se seleccionó

para una mayor investigación; también, la mayor actividad se atribuyó a la mayor área superficial, la interacción más débil entre Mn y Al₂O₃ y la mayor parte de la fase Mn₂O₃ (Ryu Hae Won et al., 2019, p.1).

Presenta en su estudio la oxidación catalítica de tolueno asistida por ozono se llevó a cabo sobre MnO_x/γ-Al₂O₃ para identificar y diferenciar el papel de los subproductos de la reacción. Se descubrió que no solo la alúmina actuaba como un reservorio para el tolueno, sino que también interactuaba de manera efectiva con el tolueno para crear carboxilatos intermedios en la superficie. Los carboxilatos de superficie eran esenciales para un proceso de oxidación eficaz y no provocaban directamente la desactivación del catalizador. La presencia de sitios Mn fue necesaria para la posterior oxidación de los carboxilatos superficiales. A 90 °C se logró una actividad catalítica estable con una conversión del 95 %. Sin embargo, a 25 °C, subproductos como el ácido acético y el ácido fórmico se acumularon en la superficie del catalizador y disminuyeron la actividad del catalizador (Aghbolaghy M. et al., 2017, p.1).

En este trabajo se estudió el efecto de la modificación con ácido nítrico sobre el carbón activado (CA) y sobre las propiedades de los catalizadores de ozono Mn/CA. Además, se investigó el rendimiento catalítico de ozono del tolueno en catalizadores modificados con diferentes concentraciones de ácido nítrico. Se encontró que el ácido nítrico podría aumentar en gran medida el contenido de oxígeno del soporte AC y el contenido de grupos oxigenados ácidos de los catalizadores. Los catalizadores modificados con ácido tenían una mayor carga de Mn en comparación con una muestra no modificada, y la valencia general del elemento Mn aumentó con el grado de modificación. Los catalizadores de Mn/AC modificados con ácido nítrico fumante tuvieron una tasa de conversión de tolueno más alta (84–87 %) que los catalizadores modificados con ácido nítrico concentrado (tasa de conversión del 63 %) y los catalizadores no modificados (tasa de conversión del 61 %) (Xu Pei-lun et al., 2020, p.1).

Investigó la oxidación catalítica profunda de tolueno en bajas concentraciones por ozono en un catalizador de Pt-Ce/BEA soportado utilizando un método de preparación sencillo. El catalizador se preparó usando un proceso simple de molienda y calcinación, y luego se caracterizó por análisis elemental de plasma acoplado inductivamente, difracción de rayos X, microscopía electrónica de transmisión,

reducción programada de temperatura de H₂, desorción programada de temperatura de O₂ y tolueno, y espectroscopía Raman ultravioleta. Los resultados de la caracterización mostraron que las nanopartículas de Pt y el CeO₂ estaban en contacto íntimo con la superficie del catalizador y se producía una fuerte interacción entre ellos. Donde, el Pt-Ce/BEA mostró un rendimiento catalítico superior (>99 % de conversión de tolueno y >99 % de selectividad de CO₂ a 90 °C) en comparación con Pt/BEA (85 % de conversión de tolueno y 63 % de selectividad de CO₂) y Ce/BEA (> 99 % de conversión de tolueno y 59 % de selectividad de CO₂) (Xiao Hailin et al., 2018, p.1).

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de investigación

Los diferentes tipos de investigaciones que encontramos para plantear un estudio nos permite el desarrollo de conocimientos en ciertas escalas, donde la investigación aplicada está un eslabón más arriba de la investigación básica es decir esta no solo busca la obtención de teorías sino el generar conocimientos que ayuden a resolver las incertidumbres sobre fenómenos presentados en la realidad en la que vivimos. Este tipo de investigación también es llamada practica o empírica (Murillo, 2008, p.5). Por ello en el presente estudio se aplicó la investigación aplicada generando conocimientos con aplicación directa en la problemática mediante estudios realizados.

El presente estudio hizo uso del diseño narrativo, este diseño permite al investigador describir los sucesos o hechos tal y como fueron contados y vividos por los participantes que tuvieron contacto con el fenómeno estudiado (Hernández, 2016, p.2), debido a ello se describieron los datos recopilados sobre Catalizadores Funcionales como Método de Tratamiento en la Ozonización Catalítica de los Compuestos Orgánicos Volátiles revisados en los artículos científicos tomados para el desarrollo de la investigación.

Para Mertens el diseño narrativo de tópico se enfoca en un tema o fenómeno en específico por ello el presente estudio aplico este diseño, enfocándose en su problemática (2018, p.7).

3.2 Categoría, subcategoría y matriz de categorización

Para este estudio de investigación se empleó la matriz apriorística, el cual se divide en categorías y subcategorías, esto de acuerdo con los problemas y objetivos plasmados en la introducción (Ver tabla N°3 en anexos).

3.3 Escenario de estudio

En el uso de artículos científicos identificamos diferentes entornos donde se desarrollaron o se suscitó la problemática por ello estas son tomadas como escenario de estudio del presente trabajo, estas son: las bibliotecas, campos de experimento o laboratorios. Por ser esta una revisión sistemática se presentan diferentes escenarios

en la información recopilada y que fue tomada para el desarrollo de la presente investigación por ello es considerada cada entorno encontrado.

3.4 Participantes

Las fuentes usadas para la recopilación de información como son las plataformas virtuales (bibliotecas virtuales y revistas científicas) conforman a los participantes del presente estudio ya que estas formaron parte de la recopilación de datos que se analizaron y respaldaron la investigación. Estas fuentes fueron: Sciencedirect, Scielo y Scopus.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las diferentes herramientas usadas en una investigación nos permitirán obtener resultados coherentes con el fenómeno estudiado.

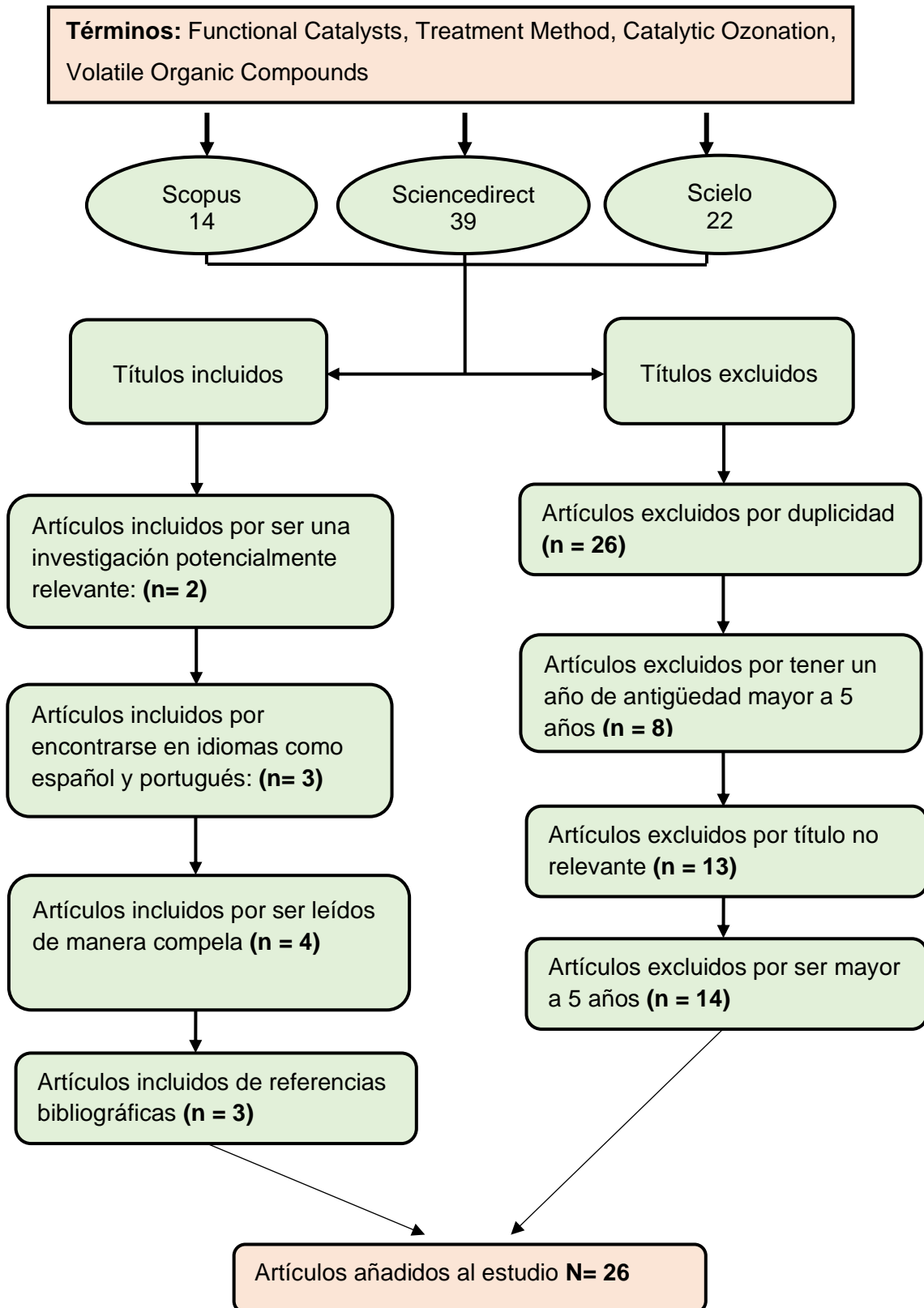
El análisis documental nos permite recopilar datos con alto grado de relevancia que serán usados en el desarrollo de la investigación. Se procede a generar un nuevo documento que será usado para la fácil recuperación de la información por parte del lector. Se hizo uso de esta herramienta analizando la información y extrayendo lo más relevante de las diferentes investigaciones que fueron analizadas.

La ficha de análisis de contenido permite conocer la información de una investigación a través de la descripción bibliográfica y permite realizar el análisis documental identificando correctamente el contenido.

3.6 Procedimientos

En el grafico N°1 se puede apreciar cómo fue la selección de los artículos científicos usados en esta investigación:

Figura N° 3: Procedimiento de selección de artículos



Elaboración propia

3.7 Rigor científico

El rigor científico permite validar una investigación y lo fiable que pueden ser sus resultados para ser usados o aplicados al resolver problemáticas encontradas. Según Castillo E. y Vásquez M.L (2003) los criterios a usar para validar una investigación son:

La credibilidad, este juicio se da a través de la recolección de datos e información ya sea de manera observable o mediante conversaciones que se dan con los participantes del estudio, donde los hallazgos sean reconocidos por ellos mismo como verdaderos a su realidad vivida. Cabe recalcar que los participantes conocen su mundo y el investigador debe aproximarse a lo que ellos piensan y sienten captando de la mejor manera su mundo, aunque parezca difícil (Castillo E. y Vásquez M.L, 2003, p.165). Debido a ello el presente estudio presentó la realidad de los informantes como lo han sentido y vivido, a través de la correcta recolección de datos sin ser tergiversados o alterados por juicios del investigador.

La Auditabilidad, con este juicio el lector o investigador que analice un estudio a través de su habilidad lograra seguir los pasos que ha dejado el autor de la investigación en la investigación de esta forma el investigador podrá lograr concluir con resultados similares o congruentes con las del investigador original si se rigen con las mismas perspectivas (Castillo E. y Vásquez M.L, 2003, p.165). La investigación aplico este criterio a través de la ruta que se plasmó al desarrollar la investigación que es comprensible para el lector.

La transferibilidad, la exhaustiva descripción de las características de un estudio logra que el investigador pueda transferir los resultados de un estudio a otros en diferentes contextos, es decir si bien no se generaliza los resultados se puede transferir los resultados a otras poblaciones. La similitud de los contextos va de la mano el grado de transferibilidad (Castillo E. y Vásquez M.L, 2003, p.166). El presente estudio describe realidades que afectan distintos campos por ello otros lectores podrían encontrar en los resultados congruencias con otras investigaciones.

3.8 Método de análisis de información

El método usado para esta investigación es de la triangulación, el cual permite el uso de diferentes métodos; para este caso se usó el método de la matriz apriorística, la cual se divide en categorías y subcategorías.

Categorías: La temperatura de reacción que ocurre la ozonización catalítica, La eficiencia como catalizador funcional en la ozonización catalítica y Los catalizadores en la ozonización catalítica.

Subcategorías:

- Materiales mesoporosos a granel
- Óxidos de metales de transición
- Basados en metales nobles

- menores a los 50 °C
- de 50°C a 100 °C
- mayores a 100°C

- % de remoción alto
- % de remoción medio
- % de remoción bajo

3.9 Aspectos éticos

La originalidad de la investigación fue evaluada a través del programa Turnitin.

Se respetó la autoría de toda información usada en el presente estudio haciendo uso de la norma ISO 690, refiriendo correctamente las referencias bibliográficas.

Se respetó la Norma Vigente por la universidad Cesar Vallejo y la Guía de productos observables.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los aspectos más relevantes de la ozonización catalítica de diferentes COVs, los catalizadores funcionales usados en la ozonización catalítica de los diferentes COVs, la temperatura de reacción en la que ocurre el método de tratamiento y la eficiencia que presentan los catalizadores funcionales de su uso. Para lo cual se buscó resolver dichos aspectos mediante las tablas 4, 5 y gráfico 3.

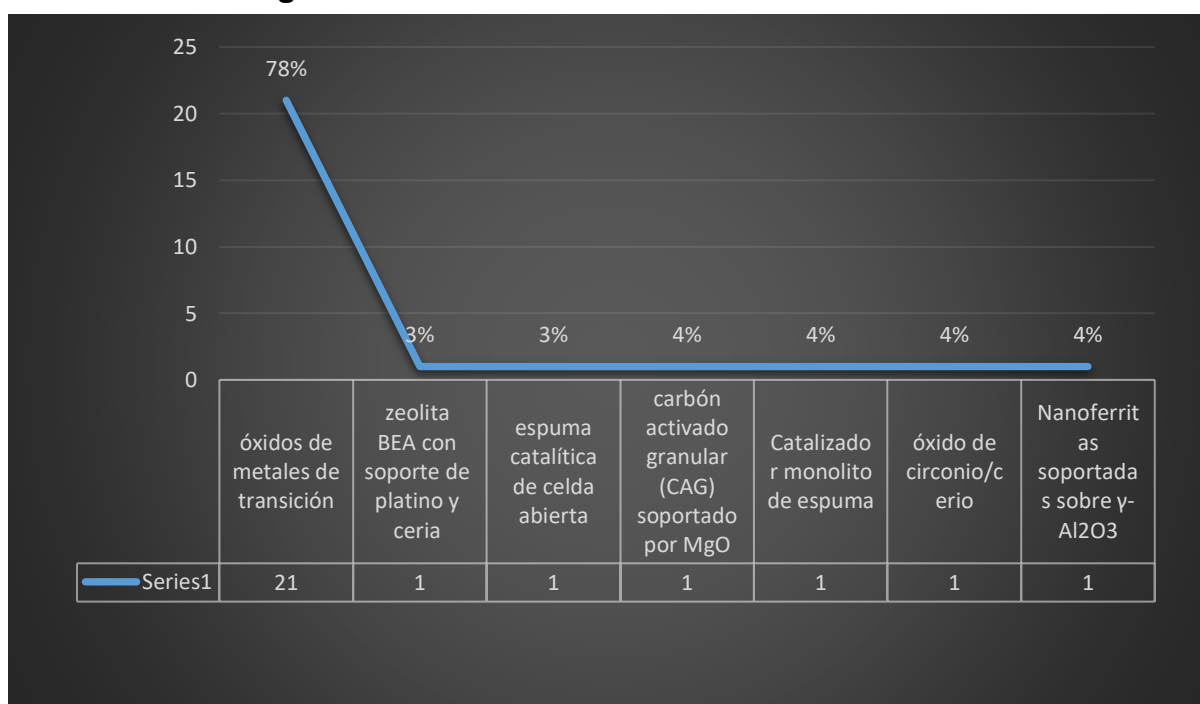
Tabla N°3: *catalizadores funcionales usados en la ozonización catalítica de los diferentes COVs*

Catalizador	Tipo de catalizador	Tipo de COV	Fuente
Co(II)/SiO₂	óxidos de metales de transición	Tolueno	Machniewski P. et al., (2021)
Mn/13X	óxidos de metales de transición	Tolueno	Gopi T. et al., (2019)
3 wt% δ-MnO₂/USY	óxidos de metales de transición	Tolueno	Yang Rujie et al., (2020)
1 wt% MnOx/USY	óxidos de metales de transición	Tolueno	Shao Qi et al., (2021)
5 wt% MnOx/Al₂O₃	óxidos de metales de transición	Tolueno	Ghavami M. et al., (2021)
5 wt% MnOx/Al₂O₃	óxidos de metales de transición	Tolueno	Shao Jiaming et al., (2020)
Mn/Al₂O₃	óxidos de metales de transición	Tolueno	Ryu Hae Won et al., (2019)
10 wt% MnOx/γ-Al₂O₃	óxidos de metales de transición	Tolueno	Aghbolaghy M. et al., (2017)
Mn/AC-0.43FN	óxidos de metales de transición	Tolueno	Xu Pei-lun et al., (2020)
Pt-Ce/BEA	zeolita BEA con soporte de platino y ceria	Tolueno	Xiao Hailin et al., (2018)
Ru-Mn/HZSM-5	óxidos de metales de transición	Tolueno	Kim Jihee et al., (2020)
0,1 wt% Ru/espuma de vidrio	espuma catalítica de celda abierta	Tolueno	Cabrol Audrey et al., (2021)
MgO/GAC	carbón activado granular (CAG) soportado por MgO	Tolueno	Rezaei Fatemeh et al., (2016)
Mn(OH)F/Ni	óxidos de metales de transición	Tolueno	Zhu Jinzhu et al., (2020)
3D-NiO1-δ/Ni	Catalizador monolito de espuma	Tolueno	Tian Shuanghong et al., (2021)

Zr_{0.77}Ce_{0.23}O₂-SiO₂	óxido de circonio/cerio	Tolueno	Teramoto Yoshiyuki et al., (2016)
ZnFe₂O₄/γ-Al₂O₃	Nanoferritas soportadas sobre γ-Al ₂ O ₃	Tolueno	Jiang Hongbin et al., (2020)
6 wt% MnOx/AC	óxidos de metales de transición	Benceno	Fang Ruimei et al., (2017)
MnOx/SiO₂ @AC	óxidos de metales de transición	Benceno	Fang Ruimei et al., (2019)
Cu-Mn/SiO₂	óxidos de metales de transición	Benceno	Einaga Hisahiro et al., (2016)
α-MnO₂	óxidos de metales de transición	COVs oxigenados / Formaldehído	Zhang Yi et al., (2019)
MnO@C	óxidos de metales de transición	COVs oxigenados / Formaldehído	Wang Hongchao et al., (2018)
10 wt% MnOx/γ-Al₂O₃	óxidos de metales de transición	COVs oxigenados / Acetona	Aghbolaghy M. et al., (2017)
10 wt% MnOx/γ-Al₂O₃	óxidos de metales de transición	COVs oxigenados / Acetona	Aghbolaghy M. et al., (2018)
MnCo/γ-Al₂O₃	óxidos de metales de transición	COVs oxigenados / Acetona	Ghavami Mehraneh et al., (2020)
0.2 wt% Pt/FeOx	óxidos de metales de transición	COVs oxigenados / Metanol	Tian Mingze et al., (2020)

Elaboración propia

Figura N°4: catalizadores funcionales más usados



Elaboración propia

Los catalizadores funcionales usados en la ozonización catalítica de los diferentes COVs son los óxidos de metales de transición como el Mn, Co, Cu, Fe y Ni; siendo ello corroborado por el 78% de los investigadores estudiados.

Así Machniewski P. et al., (2021), estudia la eficacia de la oxidación total en fase gaseosa de tolueno hacia dióxido de carbono y agua con la ayuda de ozono sobre Co(II)/SiO₂; donde el mecanismo implica la formación de radicales •OH, lo que puede explicar la eficacia de Co(II)/SiO₂ indicando menor demanda de ozono siendo entre 6 y 18 moles de ozono por mol de tolueno, generando una conversión del tolueno del 93% a 80 °C.

Zhang Yi et al., (2019), Wang Hongchao et al., (2018) y Aghbolaghy M. et al., (2017) utilizan óxidos de metales α -MnO₂, MnO@C y 10 wt% MnOx/ γ -Al₂O₃ para la eliminación de COVs oxigenados.

De igual manera Gopi T. et al. (2016, p.1), apoya lo mencionado; siendo en su estudio que, se utilizó óxidos de Ce, Cu, Co, Ag y Mn sobre 13X para eliminar tolueno, encontrando que la actividad catalítica siguió el orden de Mn/13X > Ce/13X > Cu/13X > Ag/13X > Co/13X.

Ello debido a que los óxidos de metales de transición soportados son eficaces para la ozonización catalítica del tolueno en comparación con los materiales mesoporosos a granel.

Lo que es rechazado por Xiao Hailin et al., (2018); quien menciona que los materiales meso porosos en la descomposición del ozono procede preferentemente en los sitios de ácido Lewis fuerte en las zeolitas. Así también Valdés H. et al., (2020, p.2); apoya lo mencionado, afirmando que, debido a su rica estructura de poros, su gran volumen de poros y su alta superficie específica, los materiales de zeolita también tienen una buena capacidad de adsorción para el tolueno y el ozono, lo que puede prolongar en gran medida el tiempo de residencia para que el tolueno y el ozono interactúen completamente entre sí; convirtiendo a las zeolitas en candidatos favorables para la ozonización catalítica del tolueno.

Así también, en menor cantidad fueron usados los compuestos mesoporosos a granel como la zeolita y otros materiales (por ejemplo, catalizadores basados en metales nobles), materiales carbonosos.

Tabla N°4: temperatura de reacción en la que ocurre el método de tratamiento de la ozonización catalítica

Catalizador	Tipo de COV	Temperatura de reacción (°C)	Conversión (%)	Fuente
Co(II)/SiO ₂	Tolueno	80	93	Machniewski P. et al., (2021)
Mn/13X	Tolueno	90	61	Gopi T. et al., (2019)
3 wt% δ-MnO ₂ /USY	Tolueno	25	55	Yang Rujie et al., (2020)
1 wt% MnOx/USY	Tolueno	70	99	Shao Qi et al., (2021)
5 wt% MnOx/Al ₂ O ₃	Tolueno	25	80	Ghavami M. et al., (2021)
5 wt% MnOx/Al ₂ O ₃	Tolueno	120	100	Shao Jiaming et al., (2020)
Mn/Al ₂ O ₃	Tolueno	Temperatura ambiente	99	Ryu Hae Won et al., (2019)
10 wt% MnOx/γ-Al ₂ O ₃	Tolueno	90	95	Aghbolaghy M. et al., (2017)
Mn/AC-0.43FN	Tolueno	30	87	Xu Pei-lun et al., (2020)
Pt-Ce/BEA	Tolueno	90	100	Xiao Hailin et al., (2018)
Ru-Mn/HZSM-5	Tolueno	Temperatura ambiente	36	Kim Jihee et al., (2020)
0,1 wt% Ru/espuma de vidrio	Tolueno	90	88	Cabrol Audrey et al., (2021)
MgO/GAC	Tolueno	100	91	Rezaei Fatemeh et al., (2016)
Mn(OH)F/Ni	Tolueno	25	100	Zhu Jinzhu et al., (2020)
3D-NiO1-δ/Ni	Tolueno	25	100	Tian Shuanghong et al., (2021)
Zr _{0.77} Ce _{0.23} O ₂ -SiO ₂	Tolueno	100	80	Teramoto Yoshiyuki et al., (2016)
ZnFe ₂ O ₄ /γ-Al ₂ O ₃	Tolueno	20	100	Jiang Hongbin et al., (2020)
6 wt% MnOx/AC	Benceno	25 ± 1	100	Fang Ruimei et al., (2017)
MnOx/SiO ₂ @AC	Benceno	25 ± 1	100	Fang Ruimei et al., (2019)

<i>Cu-Mn/SiO2</i>	Benceno	~70	~88	Einaga Hisahiro et al., (2016)
<i>α-MnO2</i>	COVs oxigenados / Formaldehído	Temperatura ambiente	80	Zhang Yi et al., (2019)
<i>MnO@C</i>	COVs oxigenados / Formaldehído	30	100	Wang Hongchao et al., (2018)
<i>10 wt% MnOx/γ-Al2O3</i>	COVs oxigenados / Acetona	90	87	Aghbolaghy M. et al., (2017)
<i>10 wt% MnOx/γ-Al2O3</i>	COVs oxigenados / Acetona	90	95	Aghbolaghy M. et al., (2018)
<i>MnCo/γ-Al2O3</i>	COVs oxigenados / Acetona	25	84	Ghavami Mehraneh et al., (2020)
<i>0.2 wt% Pt/FeOx</i>	COVs oxigenados / Metanol	30	100	Tian Mingze et al., (2020)

Elaboración propia

Por otro lado, se buscó determinar la temperatura de reacción en la que ocurre el método de tratamiento de la ozonización catalítica de los diferentes COVs, para lo cual se realizó una comparación de literaturas internacionales en la tabla 5, mediante la comparación del catalizador, el tipo de COV y la temperatura de reacción.

Siendo la temperatura de reacción encontrada entre los 25 °C hasta los 90 °C; aunque en la actualidad, existen unos pocos estudios sobre la ozonización catalítica de COVs como el formaldehído a temperatura ambiente.

Lo que es rechazado por Zhang Yi et al., (2019) y Wang Hongchao et al., (2018), quienes presentaron una temperatura de reacción del Formaldehído con los catalizadores α -MnO₂ y MnO@C a temperaturas de 25 °C y 30 °C y obtuvieron un 80 y 100% de conversión respectivamente.

Además, se pudo comprobar que el óxido de manganeso soportado es uno de los catalizadores más activos para la ozonización catalítica del tolueno a baja temperatura; siendo corroborado por Zhang Yi et al., (2019), quien utilizó una temperatura ambiente y obtuvo un 80% de conversión del COV. Así mismo lo respaldan Yang Rujie et al., (2020), Ghavami M. et al., (2021), Fang Ruimei et al., (2019) y Wang Hongchao et al., (2018).

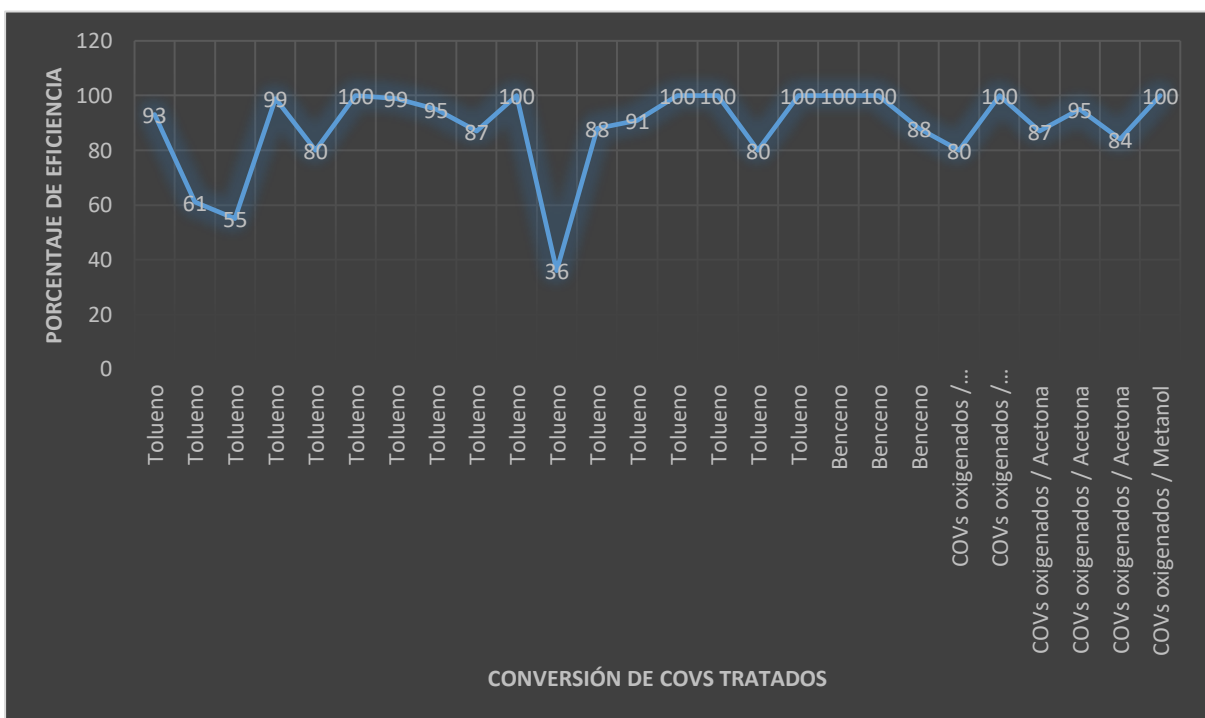
Pero, además, la actividad catalítica varía mucho para los diferentes óxidos de metales de transición; siendo ello demostrado por Machniewski et al. (2020), quien estudió al catalizador Co(II)/SiO₂ para la ozonización catalítica del tolueno logrando la mejor conversión a una temperatura de reacción de 80 °C.

Pero la afirmación mencionada, se encuentra opuesta a lo presentado en el estudio de Gopi T. et al., (2019), donde utiliza el catalizador Mn/13X, para el tratamiento de la ozonización catalítica, presentando el tolueno una conversión baja del 60% con una temperatura de reacción de 90°C.

Por otro lado, Li Kai et al., (2020, p.2) menciona que, sin la ayuda del ozono, el HCHO solo puede ser oxidado completamente por catalizadores de metales nobles en condiciones ambientales y el catalizador de Pd/CeO₂ activado por plasma durante solo 2 minutos mostró la mejor conversión de más del 76 % debido a su mayor cantidad de especies de oxígeno activo.

Por último, se requirió identificar la eficiencia del uso de catalizadores funcionales como método de tratamiento en la ozonización catalítica de diferentes COVs; presentando los resultados en el gráfico 3 respecto a la tabla 5.

Figura N°5: *eficiencia del uso de catalizadores funcionales como método de tratamiento en la ozonización catalítica de diferentes COVs*



Elaboración propia

De acuerdo con lo representado en el gráfico 3 se tiene que la eficiencia del uso de catalizadores funcionales como método de tratamiento en la ozonización catalítica de diferentes COVs es alta por el porcentaje de conversión presentado que varían del 90 al 100%.

Así también se tiene que, el tolueno es el COV que presenta rápida oxidación en la mayoría de los estudios. Siendo esto respaldado por Machniewski P. et al., (2021), Gopi T. et al., (2019), Yang Rujie et al., (2020), Shao Qi et al., (2021), Ghavami M. et al., (2021), Shao Jiaming et al., (2020), Ryu Hae Won et al., (2019), Aghbolaghy M. et al., (2017), Xu Pei-lun et al., (2020), Xiao Hailin et al., (2018), Kim Jihee et al., (2020), Cabrol Audrey et al., (2021), Rezaei Fatemeh et al., (2016), Zhu Jinzhu et al., (2020), Tian Shuanghong et al., (2021), Teramoto Yoshiyuki et al., (2016), Jiang Hongbin et al., (2020).

Así es corroborado por el estudio de Shao et al. (2020), quien menciona en su artículo, que el catalizador MnOx/ γ -Al₂O₃ poseía el mayor ácido total y la mayor cantidad de Mn³⁺, y por lo tanto realizó la mayor conversión con casi el 100% de tolueno y ozono.

Así mismo, Xu Pei-lun et al., (2020), presente en la tabla 5 demuestra que los catalizadores de Mn/AC modificados con ácido nítrico fumante tuvieron una tasa de conversión de tolueno más alta (84–87 %) que los catalizadores modificados con ácido nítrico concentrado (tasa de conversión del 63 %) y los catalizadores no modificados (tasa de conversión del 61 %).

Por otro lado, el tolueno es el COV más predominantes por los 26 estudios analizados, ello debido a que el tolueno se utiliza predominantemente como materia prima industrial o como disolvente en las industrias petroquímica, farmacéutica, de tintes, de química fina y de polímeros, convirtiéndose en un contaminante atmosférico típico del aire ambiente y de interiores

Por su parte Chen R. et al., (2020, p.2), manifiesta que, en comparación con el benceno, el tolueno es más reactivo y más fácil de oxidar; donde las moléculas de tolueno suelen activarse mediante la abstracción de hidrógeno del grupo metilo, ya que la introducción del metilo donador de electrones mejora la transferencia de carga y reduce la estabilidad del enlace π conjugado del anillo aromático.

Por otro lado, Xiao et al. (2018), informó mediante su estudio experimental sobre el uso del catalizador Pt-Ce/BEA, el cual es una zeolita, que exhibió un rendimiento catalítico superior con una conversión de tolueno y una selectividad de CO₂ superior al 99%.

V. CONCLUSIONES

Se puede concluir acerca del objetivo de estudio que los aspectos más relevantes de la ozonización catalítica son los tipos de catalizadores que se usan en la ozonización catalítica de los diferentes COVs ya que de ello se va a generar una mayor o menor eficiencia en el uso de los catalizadores funcionales; siendo estos descritos en los siguientes puntos:

Los catalizadores funcionales usados en la ozonización catalítica de los diferentes COVs son los óxidos de metales de transición como el Mn, Co, Cu, Fe y Ni; siendo ello corroborado por el 78% de los investigadores estudiados. Ello debido a que los óxidos de metales de transición soportados son eficaces para la ozonización catalítica del tolueno en comparación con los materiales meso porosos a granel.

La temperatura de reacción en la que ocurre el método de tratamiento de la ozonización catalítica de los diferentes COVs se da entre los 25 °C hasta los 90 °C; aunque en la actualidad, existen unos pocos estudios sobre la ozonización catalítica de COVs como el formaldehído a temperatura ambiente. Además, se pudo comprobar que el óxido de manganeso soportado es uno de los catalizadores más activos para la ozonización catalítica del tolueno a baja temperatura.

La eficiencia del uso de catalizadores funcionales como método de tratamiento en la ozonización catalítica de diferentes COVs es alta debido al porcentaje de conversión presentado que varían del 90 al 100%. Por otro lado, el tolueno es el COV más predominante por los 26 estudios analizados; así también se tiene que, el tolueno es el COV que presenta una más rápida oxidación en la mayoría de los estudios.

VI. RECOMENDACIONES

En base a los estudios realizados se puede inferir que, aunque se ha avanzado mucho en la eliminación de diferentes COV, todavía hay muchos problemas que deben resolverse para cumplir con los estándares de emisión de COV; debido a ello se puede realizar las siguientes recomendaciones a los futuros investigadores:

Se recomienda ampliar en nuevas tecnologías para eliminar los compuestos orgánicos volátiles o integrar estrategias existentes; como la oxidación catalítica fototérmica, la oxidación catalítica con plasma no térmico y la pre-adsorción-oxidación catalítica para mejorar la eficiencia catalítica de la depuración de COVs.

Se recomienda realizar un diseño de catalizadores eficientes con sitios activos altamente dispersos, abundantes vacantes de oxígeno, planos cristalinos altamente expuestos, estructuras y morfologías específicas.

Por último, se recomienda desarrollar estrategias de modificación de superficies simples y eficientes para mejorar aún más el rendimiento de los catalizadores.

REFERENCIAS

1. AGHBOLAGHY, Mostafa; SOLTAN, Jafar; SUTARTO, Ronny. The role of surface carboxylates in catalytic ozonation of acetone on alumina-supported manganese oxide. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, vol. 128, p. 73-84. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.10.002>
2. AGHBOLAGHY, Mostafa; SOLTAN, Jafar; CHEN, Ning. Low temperature catalytic oxidation of binary mixture of toluene and acetone in the presence of ozone. *Catalysis Letters*, 2018, vol. 148, no 11, p. 3431-3444. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10562-018-2536-8>
3. AGHBOLAGHY, Mostafa; SOLTAN, Jafar; CHEN, Ning. Role of surface carboxylates in the gas phase ozone-assisted catalytic oxidation of toluene. *Catalysis Letters*, 2017, vol. 147, no 9, p. 2421-2433. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10562-017-2143-0>
4. ALIMOHAMMADI, Mahmood; NADERI, Maziar. Effectiveness of ozone gas on airborne virus inactivation in enclosed spaces: a review study. *Ozone: Science & Engineering*, 2021, vol. 43, no 1, p. 21-31. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/01919512.2020.1822149>
5. ALVAREZ, Juan Martín; SEIJAS, Carlos J.; BIANCHI, Gustavo L. Elimination of volatile organic compounds in paint drying by absorption reaction in water combined with the ozone oxidation technique. *Environmental Advances*, 2020, vol. 2, p. 100017. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100017>
6. AZZOUZ, Imadeddine, et al. Zinc oxide nano-enabled microfluidic reactor for water purification and its applicability to volatile organic compounds. *Microsystems & Nanoengineering*, 2018, vol. 4, no 1, p. 1-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/micronano.2017.93>
7. BAGHERI, Habib; ZEINALI, Shakiba; BAKTASH, Mohammad Yahya. A single-step synthesized superhydrophobic melamine formaldehyde foam for trace determination of volatile organic pollutants. *Journal of Chromatography A*, 2017, vol. 1525, p. 10-16. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.10.012>

8. Bedia, C., Cardoso, P., Dalmau, N., Garreta-Lara, E., Gómez-Canela, C., Gorrochategui, E., ... Tauler, R. (2018). Applications of Metabolomics Analysis in Environmental Research. *Comprehensive Analytical Chemistry*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2018.07.006>
9. BOTONDI, Rinaldo, et al. Ozone fumigation for safety and quality of wine grapes in postharvest dehydration. *Food Chemistry*, 2015, vol. 188, p. 641-647. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.029>
10. BRODOWSKA, Agnieszka Joanna; NOWAK, Agnieszka; ŚMIGIELSKI, Krzysztof. Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2018, vol. 58, no 13, p. 2176-2201. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1308313>
11. CABROL, Audrey, et al. Simulation and optimization of the removal of toluene in air by ozonation with a catalytic open-cell foam. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, vol. 168, p. 453-464. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.02.025>
12. CHANG, Tian, et al. Post plasma catalysis for the removal of acetaldehyde using Mn–Co/HZSM-5 catalysts. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, vol. 58, no 32, p. 14719-14728. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02668>
13. CHEN, Ruimin, et al. Unveiling the unconventional roles of methyl number on the ring-opening barrier in photocatalytic decomposition of benzene, toluene and o-xylene. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, vol. 278, p. 119318. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119318>
14. CHENG, Jincheng, et al. Fabrication of pillar [5] arene-polymer-functionalized cotton fibers as adsorbents for adsorption of organic pollutants in water and volatile organic compounds in air. *Cellulose*, 2019, vol. 26, no 5, p. 3299-3312. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02315-1>
15. CUI, Jiahao, et al. Catalytic ozonation of volatile organic compounds (ethyl acetate) at normal temperature. *Chinese Journal of Chemical Engineering*,

2021, vol. 32, p. 159-167. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.09.021>

16. DENG, Li-Zhen, et al. Emerging chemical and physical disinfection technologies of fruits and vegetables: a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, vol. 60, no 15, p. 2481-2508. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1649633>
17. EINAGA, Hisahiro, et al. Catalytic properties of copper-manganese mixed oxides supported on SiO₂ for benzene oxidation with ozone. *Catalysis Today*, 2015, vol. 245, p. 22-27. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2014.09.018>
18. ENGELSMAN, Michelle, et al. Biomonitoring in firefighters for volatile organic compounds, semivolatile organic compounds, persistent organic pollutants, and metals: A systematic review. *Environmental Research*, 2020, vol. 188, p. 109562. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109562>
19. FANG, Ruimei, et al. Influence of peracetic acid modification on the physicochemical properties of activated carbon and its performance in the ozone-catalytic oxidation of gaseous benzene. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 420, p. 905-910. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.228>
20. FANG, Ruimei, et al. Efficient MnOx/SiO₂@ AC catalyst for ozone-catalytic oxidation of gaseous benzene at ambient temperature. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 470, p. 439-447. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.146>
21. GHAVAMI, Mehraneh, et al. Room temperature oxidation of acetone by ozone over alumina-supported manganese and cobalt mixed oxides. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2020, vol. 14, no 6, p. 937-947. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11705-019-1900-6>
22. GHAVAMI, M.; SOLTAN, J.; CHEN, N. J. C. L. Synthesis of MnOx/Al₂O₃ catalyst by polyol method and its application in room temperature ozonation of toluene in air. *Catalysis Letters*, 2021, vol. 151, no 5, p. 1418-1432. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10562-020-03393-8>

23. GOPI, T., et al. Ozone catalytic oxidation of toluene over 13X zeolite supported metal oxides and the effect of moisture on the catalytic process. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, vol. 12, no 8, p. 4502-4513. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.07.018>
24. GUO, Hai, et al. Compuestos orgánicos volátiles troposféricos en China. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 2017, vol. 574, pág. 1021-1043. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.116>
25. GUO, Xuecheng, et al. Functionalized Activated Carbon for Competing Adsorption of Volatile Organic Compounds and Water. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, vol. 13, no 47, p. 56510-56518. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c18507>
26. HE, Chi, et al. Recent advances in the catalytic oxidation of volatile organic compounds: a review based on pollutant sorts and sources. *Chemical reviews*, 2019, vol. 119, no 7, p. 4471-4568. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00408>
27. HE, Xianjun, et al. Volatile organic compounds in wintertime North China Plain: Insights from measurements of proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometer (PTR-ToF-MS). *Journal of Environmental Sciences*, 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.08.010>
28. JI, Jian, et al. Efficient catalytic removal of airborne ozone under ambient conditions over manganese oxides immobilized on carbon nanotubes. *Catalysis Science & Technology*, 2019, vol. 9, no 15, p. 4036-4046. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C9CY00762H>
29. JIANG, Hongbin, et al. Nano ferrites (AFe₂O₄, A= Zn, Co, Mn, Cu) as efficient catalysts for catalytic ozonation of toluene. 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C9RA10601D>
30. KAMAL, Muhammad Shahzad; RAZZAK, Shaikh A.; HOSSAIN, Mohammad M. Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs)—A review. *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 140, p. 117-134. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.031>

31. KIM, Jihee, et al. Catalytic ozonation of toluene using Mn–M bimetallic HZSM-5 (M: Fe, Cu, Ru, Ag) catalysts at room temperature. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, vol. 397, p. 122577. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122577>
32. KUJAWA, Joanna; CERNEAUX, Sophie; KUJAWSKI, Wojciech. Removal of hazardous volatile organic compounds from water by vacuum pervaporation with hydrophobic ceramic membranes. *Journal of membrane science*, 2015, vol. 474, p. 11-19. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.08.054>
33. LANNOY, Anthony, et al. Photocatalysis of Volatile Organic Compounds in water: Towards a deeper understanding of the role of cyclodextrins in the photodegradation of toluene over titanium dioxide. *Journal of colloid and interface science*, 2016, vol. 461, p. 317-325. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.09.022>
34. LI, Kai, et al. Complete oxidation of formaldehyde over a Pd/CeO₂ catalyst at room temperature: tunable active oxygen species content by non-thermal plasma activation. *Catalysis Science & Technology*, 2020, vol. 10, no 18, p. 6257-6265. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/D0CY01085E>
35. LI, Rong, et al. Genetic algorithm (GA)-Artificial neural network (ANN) modeling for the emission rates of toxic volatile organic compounds (VOCs) emitted from landfill working surface. *Journal of environmental management*, 2022, vol. 305, p. 114433. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114433>
36. LI, Xiaotong; MA, Jinzhu; HE, Hong. Recent advances in catalytic decomposition of ozone. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, vol. 94, p. 14-31. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.03.058>
37. LIM, Y. K., et al. Halocarbon emissions from marine phytoplankton and climate change. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2017, vol. 14, no 6, p. 1355-1370. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1219-5>
38. LIMMER, Matt; BURKEN, Joel. Phytovolatilization of organic contaminants. *Environmental science & technology*, 2016, vol. 50, no 13, p. 6632-6643. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04113>

39. LIU, Mengdi, et al. Cyanobacteria blooms potentially enhance volatile organic compound (VOC) emissions from a eutrophic lake: Field and experimental evidence. *Environmental Research*, 2021, vol. 202, p. 111664. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111664>
40. LU, Rui, et al. High-sensitivity infrared attenuated total reflectance sensors for in situ multicomponent detection of volatile organic compounds in water. *Nature protocols*, 2016, vol. 11, no 2, p. 377-386. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/nprot.2016.013>
41. LIU, Shuilian, et al. Facile synthesis of amorphous mesoporous manganese oxides for efficient catalytic decomposition of ozone. *Catalysis Science & Technology*, 2018, vol. 8, no 16, p. 4264-4273. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C8CY01111G>
42. Macaya, C. C., Durán, R. E., Hernández, L., Rodríguez-Castro, L., Barra-Sanhueza, B., Dorochesi, F., & Seeger, M. (2019). Bioremediation of Petroleum. Reference Module in Life Sciences. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809633-8.20810-8>
43. MACHNIEWSKI, Piotr; BIŃ, Andrzej; KŁOSEK, Katarzyna. Effectiveness of toluene mineralization by gas-phase oxidation over Co (II)/SiO₂ catalyst with ozone. *Environmental Technology*, 2021, vol. 42, no 25, p. 3987-3994. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1770868>
44. MONTERO-MONTOYA, Regina; LÓPEZ-VARGAS, Rocío; ARELLANO-AGUILAR, Omar. Volatile organic compounds in air: sources, distribution, exposure and associated illnesses in children. *Annals of global health*, 2018, vol. 84, no 2, p. 225. Disponible en: <https://doi.org/10.29024/aogh.910>
45. MORIN, Julien, et al. Application of a mineral binder to reduce VOC emissions from indoor photocatalytic paints. *Building and Environment*, 2019, vol. 156, p. 225-232. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.031>
46. MOURA, Leila, et al. Deep eutectic solvents as green absorbents of volatile organic pollutants. *Environmental Chemistry Letters*, 2017, vol. 15, no 4, p. 747-753. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0654-y>

47. QI, Dianpeng, et al. Polymeric Membranes with Selective Solution-Diffusion for Intercepting Volatile Organic Compounds during Solar-Driven Water Remediation. *Advanced Materials*, 2020, vol. 32, no 50, p. 2004401. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/adma.202004401>
48. REZAEI, Fatemeh, et al. Toluene removal from waste air stream by the catalytic ozonation process with MgO/GAC composite as catalyst. *Journal of hazardous materials*, 2016, vol. 306, p. 348-358. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.11.026>
49. ROJAS, Sara; HORCAJADA, Patricia. Metal–organic frameworks for the removal of emerging organic contaminants in water. *Chemical reviews*, 2020, vol. 120, no 16, p. 8378-8415. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00797>
50. RYU, Hae Won, et al. Removal of toluene using ozone at room temperature over mesoporous Mn/Al₂O₃ catalysts. *Environmental research*, 2019, vol. 172, p. 649-657. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.016>
51. Sagar, T. V., & Abhishek, B. Production techniques of functional solid catalysts. *Advanced Functional Solid Catalysts for Biomass Valorization*. 2020. 39–75. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820236-4.00002-7>
52. SALTHAMMER, T. Very volatile organic compounds: an understudied class of indoor air pollutants. *Indoor air*, 2016, vol. 26, no 1, p. 25-38. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/ina.12173>
53. SHAO, Jiaming, et al. Low temperature catalytic ozonation of toluene in flue gas over Mn-based catalysts: Effect of support property and SO₂/water vapor addition. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, vol. 266, p. 118662. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118662>
54. SHAYEGAN, Zahra; HAGHIGHAT, Fariborz; LEE, Chang-Seo. Photocatalytic oxidation of volatile organic compounds for indoor environment applications: three different scaled setups. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 357, p. 533-546. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.167>

55. SHAO, Qi, et al. Manganese supported on controlled dealumination Y-zeolite for ozone catalytic oxidation of low concentration toluene at low temperature. *Chemosphere*, 2021, vol. 271, p. 129604. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129604>
56. SHU, Yajie, et al. Catalytic oxidation of VOCs over Mn/TiO₂/activated carbon under 185 nm VUV irradiation. *Chemosphere*, 2018, vol. 208, p. 550-558. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.011>
57. SILVA, Cleyton Martins da, et al. Evaluación de la eficiencia del método TO-15 para la determinación de compuestos orgánicos volátiles em condições típicas de ambiente urbano. *Química Nova*, 2016, vol. 39, pág. 1245-1253. Disponible en: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160142>
58. SILVA, José Avelino, et al. An analytical multi-residue approach for the determination of semi-volatile organic pollutants in pine needles. *Analytica chimica acta*, 2016, vol. 858, p. 24-31. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.12.042>
59. TERAMOTO, Yoshiyuki, et al. Zirconium/cerium oxide solid solutions with addition of SiO₂ as ozone-assisted catalysts for toluene oxidation. *Catalysis Communications*, 2015, vol. 61, p. 112-116. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2014.12.022>
60. TIAN, Mingze, et al. Complete Degradation of Gaseous Methanol over Pt/FeO_x Catalysts by Normal Temperature Catalytic Ozonation. *Environmental science & technology*, 2020, vol. 54, no 3, p. 1938-1945. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06342>
61. TIAN, Shuanghong, et al. Electrodeposition synthesis of 3D-NiO_{1-δ} flowers grown on Ni foam monolithic catalysts for efficient catalytic ozonation of VOCs. *Journal of Catalysis*, 2021, vol. 398, p. 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2021.04.011>
62. UETA, Ikuo, et al. Determination of very volatile organic compounds in water samples by purge and trap analysis with a needle-type extraction device. *Journal of Chromatography A*, 2015, vol. 1397, p. 27-31. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.04.016>

63. VALDÉS, Héctor, et al. New insight of the influence of acidic surface sites of zeolite on the ability to remove gaseous ozone using operando DRIFTS studies. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, vol. 294, p. 109912. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109912>
64. VICKERS, Neil J. Animal communication: when i'm calling you, will you answer too?. *Current biology*, 2017, vol. 27, no 14, p. R713-R715. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.064>
65. VINOD, Vellora Thekkae Padil, et al. Gum karaya (*Sterculia urens*) stabilized zero-valent iron nanoparticles: characterization and applications for the removal of chromium and volatile organic pollutants from water. *RSC advances*, 2017, vol. 7, no 23, p. 13997-14009. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C7RA00464H>
66. WANG, Hongchao, et al. Trifunctional C@ MnO catalyst for enhanced stable simultaneously catalytic removal of formaldehyde and ozone. *ACS Catalysis*, 2018, vol. 8, no 4, p. 3164-3180. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b00309>
67. WOJTYŁA, Szymon; ŚPIEWAK, Klaudyna; BARAN, Tomasz. Synthesis, characterization and activity of doped graphitic carbon nitride materials towards photocatalytic oxidation of volatile organic pollutants emitted from 3D printer. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2020, vol. 391, p. 112355. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112355>
68. XIAO, Hailin, et al. Ozone-enhanced deep catalytic oxidation of toluene over a platinum-ceria-supported BEA zeolite catalyst. *Molecular Catalysis*, 2018, vol. 460, p. 7-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2018.09.005>
69. XU, Pei-lun, et al. Effect of different nitric acid concentrations on manganese/activated carbon-modified catalysts for the catalytic ozonation of toluene. *Catalysis Science & Technology*, 2020, vol. 10, no 19, p. 6729-6737. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/D0CY01100B>
70. YADAV, Shailendra; DHODPAKAR, Rita; KAPLEY, Atya. Disinfection by-products and their effect on aquatic and agriculture ecosystem. *En Disinfection*

By-products in Drinking Water. Butterworth-Heinemann, 2020. p. 205-233.
Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102977-0.00010-X>

71. YAN, Hailong; ZHOU, Yi-Ge. Electrical sensing of volatile organic compounds in exhaled breath for disease diagnosis. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2021, p. 100922. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100922>
72. YANG, Cuiting, et al. Abatement of various types of VOCs by adsorption/catalytic oxidation: A review. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 370, p. 1128-1153. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.232>
73. YAO, Minwei, et al. Effects of volatile organic compounds on water recovery from produced water via vacuum membrane distillation. *Desalination*, 2018, vol. 440, p. 146-155. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.012>
74. YANG, Ruijie, et al. The performance and reaction pathway of δ -MnO₂/USY for catalytic oxidation of toluene in the presence of ozone at room temperature. *Chemosphere*, 2020, vol. 247, p. 125864. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125864>
75. YU, Yi, et al. Activated carbon supported MnO nanoparticles for efficient ozone decomposition at room temperature. *Catalysis Today*, 2020, vol. 355, p. 573-579. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.05.063>
76. ZHANG, Xueyang, et al. Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review. *Journal of hazardous materials*, 2017, vol. 338, p. 102-123. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.013>
77. ZHANG, Yi, et al. Simultaneous catalytic elimination of formaldehyde and ozone over one-dimensional rod-like manganese dioxide at ambient temperature. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2019, vol. 94, no 7, p. 2305-2317. Disponibile en: <https://doi.org/10.1002/jctb.6023>
78. ZHANG, Zhixiang; JIANG, Zheng; SHANGGUAN, Wenfeng. Low-temperature catalysis for VOCs removal in technology and application: A state-of-the-art review. *Catalysis Today*, 2016, vol. 264, p. 270-278. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.10.040>

79. ZHONG, Lexuan; HAGHIGHAT, Fariborz. Photocatalytic air cleaners and materials technologies—abilities and limitations. *Building and Environment*, 2015, vol. 91, p. 191-203. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.033>
80. ZHOU, Menglian, et al. A fully automated portable gas chromatography system for sensitive and rapid quantification of volatile organic compounds in water. *RSC advances*, 2016, vol. 6, no 55, p. 49416-49424. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C6RA09131H>
81. ZHU, Jinzhu, et al. Catalytic activity and mechanism of fluorinated MgO film supported on 3D nickel mesh for ozonation of gaseous toluene. *Environmental Science: Nano*, 2020, vol. 7, no 9, p. 2723-2734. Disponible en: . <https://doi.org/10.1039/D0EN00475H>
82. ZIMMERMANN, Jeremy; WANNER, Philipp; HUNKELER, Daniel. Compound-specific carbon isotope analysis of volatile organic compounds in complex soil extracts using purge and trap concentration coupled to heart-cutting two-dimensional gas chromatography–isotope ratio mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 2021, vol. 1655, p. 462480. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2021.462480>


ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Categorización Apriorística

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Unidad de análisis
Clasificar cuáles son los catalizadores funcionales usados en la ozonización catalítica de los diferentes COVs	¿Cuáles son los catalizadores funcionales usados en la ozonización catalítica de los diferentes COVs?	Los catalizadores en la ozonización catalítica (Chang Tian et al., 2019, p.3)	<ul style="list-style-type: none"> - Materiales mesoporosos a granel - Óxidos de metales de transición - Basados en metales nobles 	(Brodowska A. et al., 2018, p.4), (Guo et al. 2017, p.1022), (Shao Qi et al., 2021, p.2)
Determinar cuál es la temperatura de reacción en la que ocurre el método de tratamiento de la ozonización catalítica de los diferentes COVs	¿Cuáles es la temperatura de reacción en la que ocurre el método de tratamiento de la ozonización catalítica de los diferentes COVs?	La temperatura de reacción que ocurre la ozonización catalítica (Wojtyla S. et al., 2020, p.5)	<ul style="list-style-type: none"> - menores a los 50 °C - de 50°C a 100 °C - mayores a 100°C 	(Ji Jian et al., 2019, p.3), (Ghavami M. et al., 2021 p.2), (Zhang V. et al., 2017, p.1)
Identificar la eficiencia del uso de catalizadores funcionales como método de tratamiento en la ozonización catalítica de diferentes COVs	¿Cuál es la eficiencia del uso de catalizadores funcionales como método de tratamiento en la ozonización catalítica de diferentes COVs?	La eficiencia como catalizador funcional en la ozonización catalítica (Shao Jiaming et al., 2020, p.2)	<ul style="list-style-type: none"> - % de remoción alto - % de remoción medio - % de remoción bajo 	(Yu Yi et al., 2020, p.1), (Liu Shuilian et al., 2018, p.2), (Tian Mingze et al., 2020, p.1)

Elaboración propia

ANEXOS N° 2

	FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO	
DATOS DEL AUTOR: NOMBRE(S)		
PAGINAS UTILIZADAS	AÑO DE PUBLICACIÓN	LUGAR DE PUBLICACIÓN
TIPO DE INVESTIGACIÓN:		AUTOR (ES):
CÓDIGO:		
PALABRAS CLAVES:	Functional Catalysts, Treatment Method, Catalytic Ozonation, Volatile Organic Compounds	
LA EFICIENCIA COMO CATALIZADOR FUNCIONAL EN LA OZONIZACIÓN CATALITICA		
LA TEMPERATURA DE REACCION QUE OCURRE LA OZONIZACIÓN CATALITICA		
LOS CATALIZADORES EN LA OZONIZACIÓN CATALITICA		
RESULTADOS:		
CONCLUSIONES:		

Elaboración propia