

El Problema de los Agentes Contaminantes en el Medio Ambiente y su Posible Eliminación Mediante el Uso de Perovskitas

Environmental Pollutants Issues in the Environment and Its Removing Using Perovskites

Víctor E. Comparán-Padilla¹, María T. Romero-de la Cruz², Reyes García-Díaz³, Mildred Flores-Guerrero⁴

¹ Centro de Investigación en Química Aplicada, Química Macromolecular y Nanomateriales, Blvd. Enrique Reyna, C.P. 25294, Saltillo, Coahuila, México.

² Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Unidad Camporredondo, Edif. A, C.P. 25000, Saltillo, Coahuila, México.

³ CONACyT-Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Unidad Camporredondo, Edif. A, C.P. 25000, Saltillo, Coahuila, México.

⁴ Centro de Investigación en Química Aplicada, Laboratorio Central de Caracterización Química, Blvd. Enrique Reyna, C.P. 25294, Saltillo, Coahuila, México.

Autor de correspondencia: Víctor Eduardo Comparán Padilla

Adscripción: Centro de Investigación en Química Aplicada

Correo electrónico: victor.comparan@ciqa.edu.mx

Celular: +52 (844) 8923167

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8418-2387>

Resumen

El desarrollo social y económico a nivel mundial se ha debido principalmente a la industrialización y la sociedad humana, sin embargo, también han contribuido al incremento de la contaminación ambiental. La contaminación del aire es un riesgo para la salud humana ya que nos hace más susceptible a las infecciones respiratorias y otras enfermedades. La contaminación del medio ambiente también afecta a los bosques y ecosistemas acuáticos, debido a la presencia de contaminantes (como óxidos de nitrógeno y de azufre), los cuales se producen principalmente por la quema de combustibles fósiles.

México enfrenta el reto de atender numerosos problemas relacionados con el medio ambiente, al igual que muchos países del mundo, que podrían ser en el futuro inmediato un serio obstáculo en su desarrollo y lograr la sustentabilidad. El incremento en las emisiones de contaminantes han sido la causa de algunos de los problemas ambientales más importantes que enfrentamos en la actualidad, entre ellos la degradación de la capa de ozono, el efecto invernadero, el cambio climático y la disminución de la calidad del aire. Se han realizado diversos estudios para disminuir los niveles de contaminación, entre los que se encuentran la transformación de contaminantes presentes en el aire y en el agua. En los últimos años se ha investigado acerca de la transformación de monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) presentes en el aire, así como, la eliminación de residuos farmacéuticos, tintas y otros contaminantes presentes en el agua. Además, con el objetivo de reducir los niveles de contaminación, principalmente en el aire y en el agua se ha estudiado el uso de materiales tipo perovskitas. Estos materiales son un tipo de óxidos metálicos muy versátiles, capaces de actuar frente a diferentes aplicaciones ambientales. Las perovskitas son materiales de gran interés debido a su composición química flexible, abundancia y estabilidad estructural, propiedades que las hacen muy atractivas

para aplicaciones ambientales, tales como la catálisis y electrocatálisis; ya que la catálisis se considera un proceso útil para el abatimiento de contaminantes.

Palabras clave: agentes contaminantes, medio ambiente, perovskitas

Abstract

The social and economic development worldwide has been mainly due to industrialization and human society, however they have also contributed to the increase in environmental pollution. Air pollution is a risk to human health as it makes us more susceptible to respiratory infections and other diseases. Environmental pollution also affects forests and aquatic ecosystems, due to the presence of pollutants (such as nitrogen and sulfur oxides), which are mainly produced by fossil fuels burning.

Mexico faces the challenge of addressing numerous problems related to the environment, like many countries in the world, which could be a serious obstacle in the near future to continue with its development and achieve sustainability. The increase in pollutant emissions has been the cause of some of the most important environmental problems we face today, including the degradation of the stratospheric ozone layer, climate change and the deterioration of air quality. Several studies have been carried out in order to reduce pollution levels, among which are the transformation of pollutants present in the air and in the water. In recent years, research has been carried out on the transformation of carbon monoxide (CO), methane (CH₄) and volatile organic compounds (VOCs) present in the air, as well as the elimination of pharmaceutical residues, dyes and other contaminants present in water. In addition, with the aim of reducing pollution levels, mainly in the air and water, the use of perovskite-type materials has been studied. These materials are a type of very versatile metal oxides, capable of acting against different environmental applications. Perovskites are materials of great interest due to their flexible chemical composition, abundance and structural stability, properties that make them very

attractive for environmental applications, such as catalysis and electrocatalysis. Because, catalysis is considered a useful process for the removing of contaminants.

Keywords: pollutants, environment, perovskites

Introducción

La salud y prosperidad del ser humano dependen en gran medida de la salud del planeta en que vivimos. El aire que respiramos, el agua que bebemos, los alimentos que consumimos, hasta la energía que alimenta los hogares y negocios, dependen directamente de la naturaleza, por lo que es imprescindible proteger y mantener la salud del medio ambiente. El desarrollo de la sociedad humana, la industrialización y los procesos naturales contribuyen considerablemente en el desarrollo social y económico a nivel mundial, sin embargo, también han contribuido al incremento de la contaminación ambiental (aire, suelo y agua) (Gove, 2019).

Uno de los principales elementos ambientales vitales para el ser humano y que actualmente presenta un alto nivel de contaminación, es el aire. La contaminación del aire es el principal riesgo ambiental para la salud humana ya que nos hace más susceptible a las infecciones respiratorias y otras enfermedades; además la contaminación del aire es la cuarta mayor amenaza para la salud pública después del cáncer, las enfermedades cardíacas y la obesidad. Por lo que, en la actualidad, disminuir los niveles de contaminación es uno de los temas de principal interés tanto de los gobiernos como en el área de las ciencias (Vargas, 2005; Riojas y col., 2013). Además de los efectos que la contaminación tiene sobre la salud de las personas, la contaminación ambiental también afecta a los bosques y ecosistemas acuáticos, debido a la presencia de contaminantes, como óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x), los cuales se producen por la quema de combustibles fósiles y que, al combinarse con el agua presente en la atmósfera, provocan el fenómeno conocido como lluvia ácida (Jin, 2022; Roper, 2020).

El Medio Ambiente en México

México, al igual que muchos países del mundo, enfrenta el reto de atender numerosos problemas relacionados con el medio ambiente que podrían constituir en el futuro inmediato un serio obstáculo para continuar con su crecimiento y volverse sustentable. Algunos de los desafíos más importantes que tiene México en el tema del medio ambiente es reducir la pérdida y degradación de sus ecosistemas terrestres y acuáticos, conservar su biodiversidad, asegurar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, avanzar en su adaptación a los efectos del cambio climático y mejorar la calidad del aire en muchas zonas urbanas del país, por mencionar algunos (SEMARNAT, 2019).

Es bien sabido que los problemas mencionados trascienden la esfera ambiental y tienen una fuerte relación con el bienestar social y desarrollo económico. En parte, el impacto en el medio ambiente también afecta aspectos sociales como son: la salud, la seguridad alimentaria, promueven la migración y perjudican la actividad económica en el territorio y sus intercambios con el exterior, siendo esta la razón por la que se acelera la necesidad de emprender acciones adecuadas y oportunas que permitan avanzar en su solución de manera inmediata (Greenpeace, 2021; SEMARNAT, 2019).

El tamaño de la población ha sido una de las causas más frecuentemente citadas para explicar la sobreexplotación de los recursos naturales y la degradación ambiental. No obstante, se reconoce que el crecimiento poblacional per se no es el único factor que determina el impacto de la presión que se ejerce sobre el ambiente y los recursos naturales. La capacidad económica y los hábitos de consumo tienen una influencia importante, así como la eficiencia de los medios de producción empleados para obtener los satisfactores, por ejemplo: comida, vestimenta, energía eléctrica, transporte y electrónicos. Otras variables como la desigualdad, el nivel de

urbanización, el régimen jurídico y la institucionalidad también modifican la dinámica de las causas subyacentes de la presión ambiental (Lamsal y col., 2013).

La contaminación seguirá incrementando considerando que la población sigue creciendo y concentrándose en las zonas urbanas. En 2015 la población en México alcanzó 119.9 millones de personas. En ese mismo año, las 59 zonas metropolitanas albergaban 68.1 millones de personas (56.98% de la población nacional), según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Se espera que la población nacional siga creciendo para alcanzar en 2050 los 150.8 millones de habitantes (Figura 1) (INEGI, 2020).

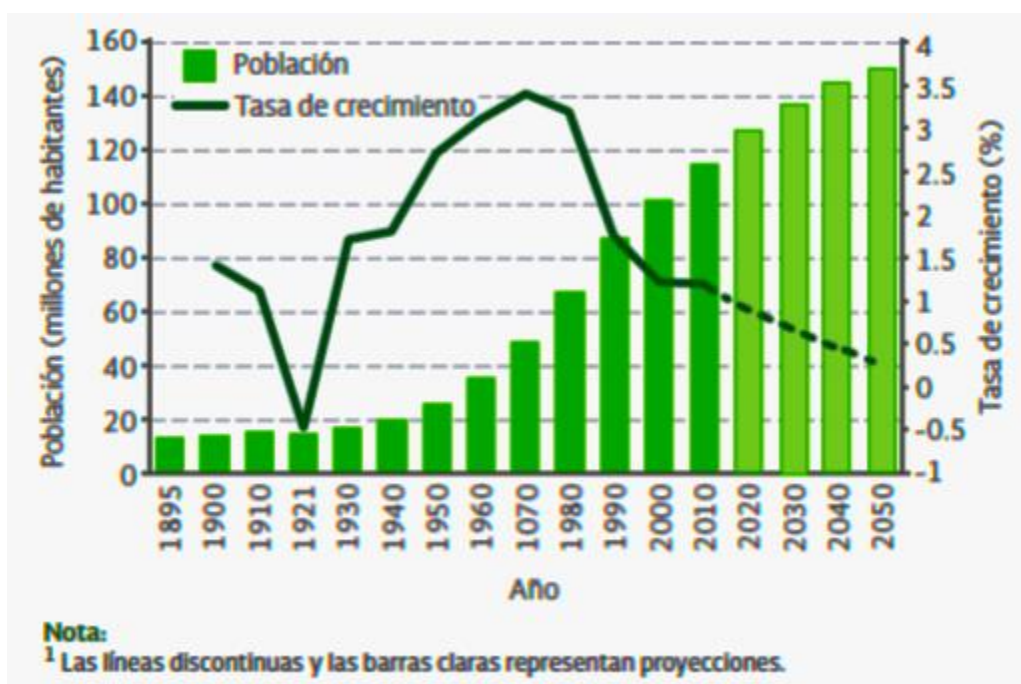


Figura 1. Población total y tasa de crecimiento en México, 1895-2050¹.

Fuente: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Resumen15_ejecutivo.pdf

A la atmósfera se liberan una enorme cantidad de sustancias producidas por las actividades humanas (industriales, agrícolas y ganaderas); aunque algunas de ellas

pueden degradarse en la atmósfera, deponerse (en la tierra o en los océanos) o integrarse en los ciclos biogeoquímicos, el incremento de las emisiones de contaminantes es la causa de varios de los problemas ambientales más graves que enfrentamos en la actualidad, entre ellos la degradación de la capa de ozono estratosférico, el cambio climático y el deterioro de la calidad del aire en las zonas urbanas. De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones más reciente, a nivel nacional se emitieron alrededor de 59 millones de toneladas de contaminantes en 2008. Las fuentes naturales emitieron el 21% de los contaminantes y las antropogénicas (producida por la actividad humana, principalmente sector industrial) el 79% restante. El mayor volumen emitido por fuentes antropogénicas provino de las fuentes móviles carreteras (58%), seguidas por las fuentes de área (13%), las fuentes fijas (7%) y las fuentes móviles no carreteras (1%) (Figura 2) (SEMARNAT, 2016).

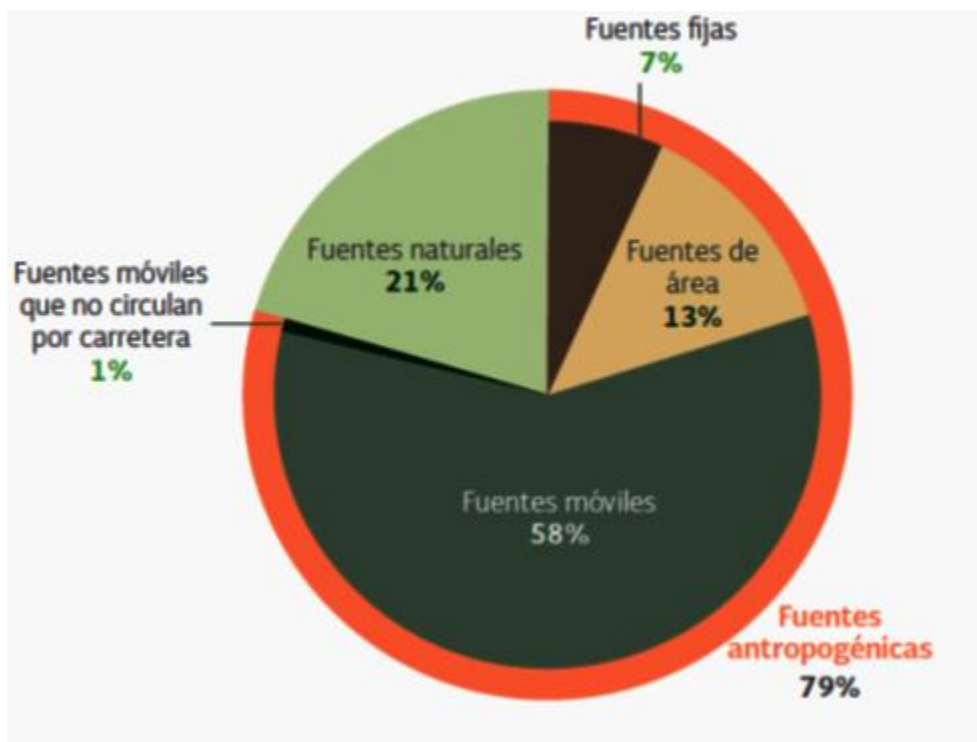


Figura 2. Emisión nacional de contaminantes por fuente.

Fuente: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Resumen15_ejecutivo.pdf

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Invernadero 2015, el gas más relevante que emite nuestro país es el bióxido de carbono (CO₂) con 71% de las emisiones, las emisiones totales de CO₂ fueron de 683 millones de toneladas (Mt), seguido del metano con 21%. Del total de las emisiones, 64% corresponden al consumo de combustibles fósiles; 10% se derivaron de los sistemas de producción pecuaria; 8% provienen de los procesos industriales; 7% se emitieron por el manejo de residuos; 6% por las emisiones fugitivas por extracción de petróleo, gas y minerías y 5% se generaron por actividades agrícolas. En el inventario también se contabilizaron 148 Mt CO₂ absorbidas por la vegetación, principalmente en bosques y selvas. El balance neto entre emisiones y absorciones para el año 2015 fue de 535 Mt CO₂ (Figura 3) (INECC, 2018).



Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2015

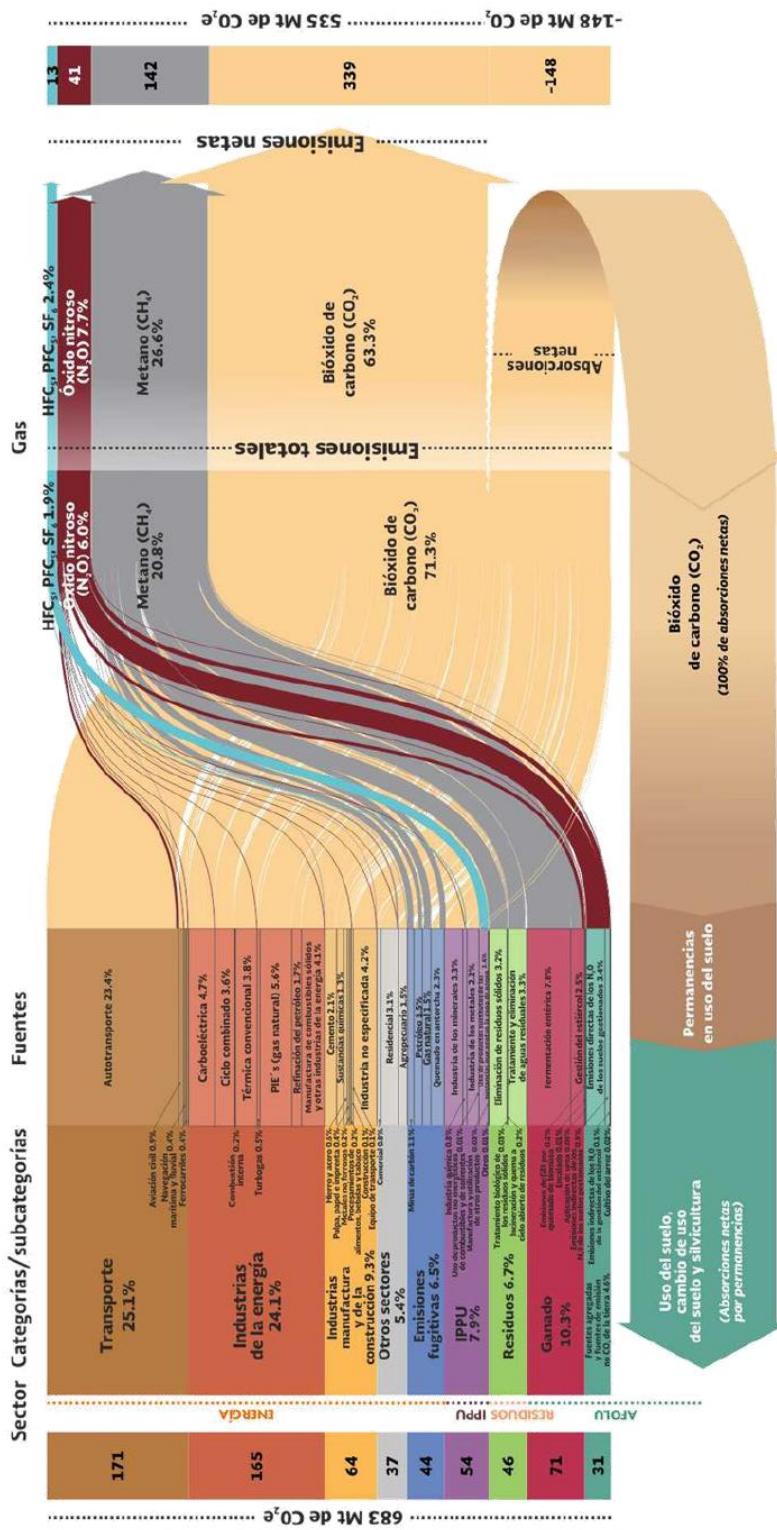


Figura 3. Emisión nacional de gases efecto invernadero, según sector, 2015.

Fuente:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311180/Imagen_INEGYCEI_2015.pdf

El tamaño máximo del agujero de ozono en 2015 fue de 28.2 millones de kilómetros cuadrados (Figura 4), lo que equivale a 1.9 veces la superficie de Antártica (SEMARNAT, 2016).

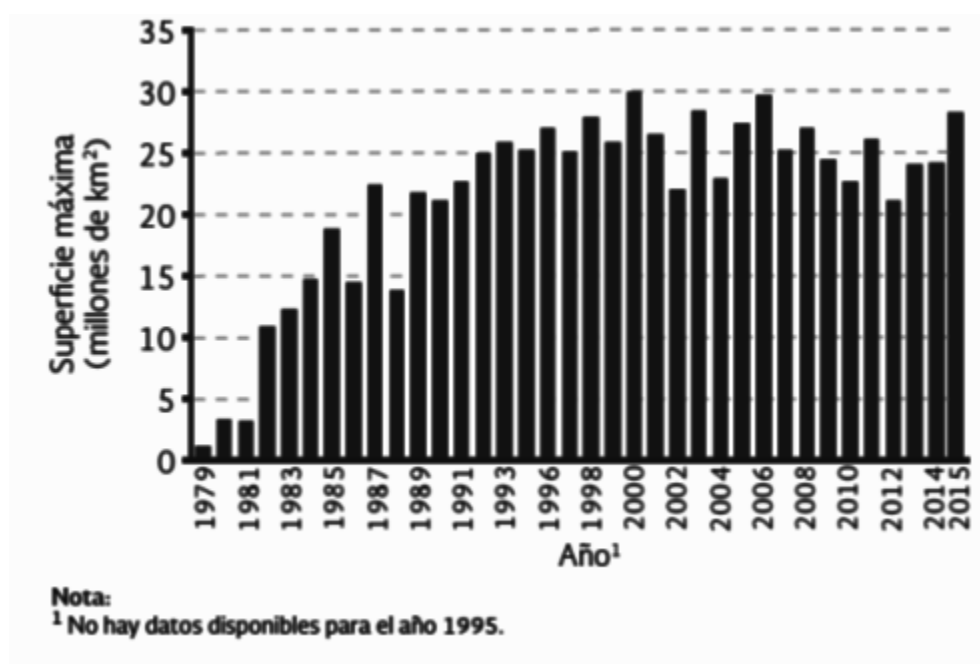
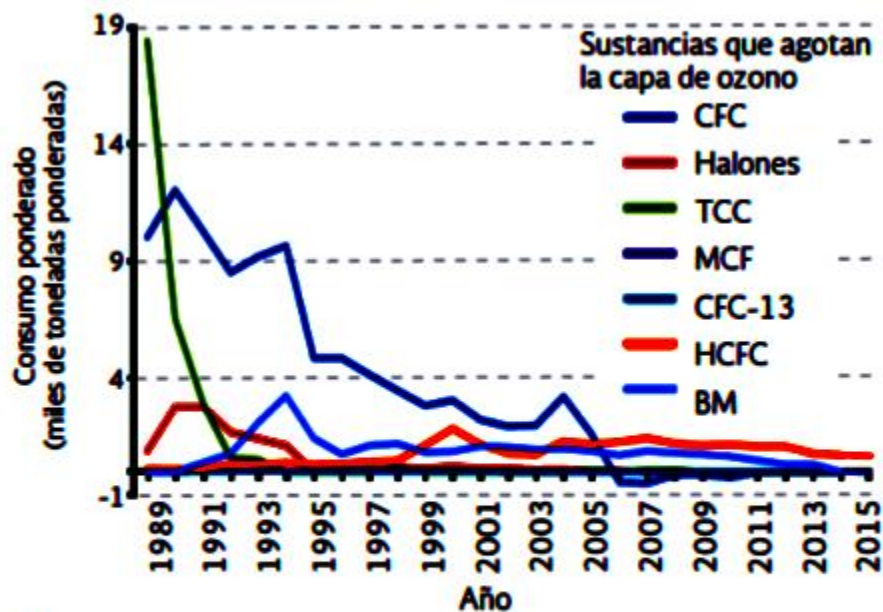


Figura 4. Extensión máxima del agujero de ozono, 1979-2015¹. Fuente:

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Resumen15_ejecutivo.pdf

En México, el consumo de las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono (SAO) disminuyó alrededor de 98% entre 1989 y 2015 (pasó de 29 mil a 610.2 toneladas) (Figura 5). Las principales sustancias que agotan la capa de ozono son los compuestos halogenados como los clorofluorocarburos (CFC) (SEMARNAT, 2016).



Nota:
¹ El consumo es el resultado de la producción más la importación menos la exportación. Algunos datos de consumo son negativos debido a que la exportación fue mayor a la producción. El consumo neto es ponderado por el potencial de agotamiento de la capa de ozono que posee cada sustancia.

Figura 5. Consumo nacional ponderado¹ de sustancias que agotan la capa de ozono, 1989-2015.

Clorofluorocarburos (CFC), tetracloruro de carbono (TCC), metilcloroformo (MCF), clorofluorocarbano-13 (CFC-13), hidroclorofluorocarbonos (HCFC), bromuro de metilo (BM).

Fuente: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Resumen15_ejecutivo.pdf

México, al igual que otros países, enfrenta ya los efectos del cambio climático. Entre los cambios más importantes observados en el país están los incrementos de la temperatura (0.85 °C en promedio en los últimos cincuenta años) y el nivel del mar (en algunos sitios del Golfo de México se ha elevado entre 1.79 y 9.16 milímetros/año y en el Pacífico entre 4.23 y 3.28 mm/año), diversos impactos en la biodiversidad y cambios en los patrones de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (SEMARNAT, 2016).

Perovskitas Removiendo la Contaminación

Considerando que el tema de la contaminación es alarmante para la sociedad, a la fecha se han realizado diversos estudios para disminuir los niveles de contaminación, entre los que se encuentran los relacionados con la transformación de contaminantes presentes en el aire y en el agua. La transformación de monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) presentes en el aire, así como la eliminación de residuos farmacéuticos, tintas y otros contaminantes presentes en el agua, han sido tema de estudio en los últimos años. Con el objetivo de reducir los niveles de contaminación, principalmente en el aire y en el agua se ha estudiado el uso de materiales tipo perovskitas. Estos materiales son un tipo de óxidos metálicos muy versátiles, capaces de actuar frente a diferentes aplicaciones ambientales. Tienen fórmula general ABX₃ (A₂BX₄), donde A y B son cationes y X es un anión (generalmente óxidos u halógenos). Las perovskitas son materiales de gran interés debido a su composición química flexible, abundancia y estabilidad estructural. Entre las propiedades que poseen estos materiales que los hacen muy atractivos para aplicaciones ambientales, se encuentra la aplicación en catálisis y electrocatálisis; ya que la catálisis se considera un proceso útil para el abatimiento de contaminantes (Rao y col., 2018; Ponraj y col., 2017).

En cuanto al tema de la contaminación del aire, entre los contaminantes altamente peligrosos presentes en el aire se encuentran los Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs), los cuales son compuestos que en su estructura contienen carbono y algún otro elemento químico como el oxígeno, nitrógeno, azufre, entre otros. Los VOCs se encuentran en forma gaseosa a temperatura ambiente por lo que están presentes en el aire que respiramos. Algunos de los VOCs que se encuentran en el aire y que son nocivos para la salud del ser humano y para el medio ambiente son los compuestos aromáticos (benceno, tolueno, xileno, etc.), derivados halogenados (cloruro de vinilo, etc.), hidrocarburos (metano, etano, etc.), así como derivados nitrogenados, entre otros (Zang y col., 2019).

Una técnica prometedora para disminuir la presencia de VOCs en el aire es la oxidación catalítica, la cual es una técnica que ofrece el control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles, ya que logra la combustión completa de los VOCs a temperaturas bajas debido a la presencia de un catalizador. Dentro de los estudios realizados para disminuir los niveles de contaminación ambiental haciendo uso de la combustión catalítica y materiales del tipo perovskitas, se encuentra el reportado por Einaga y col. en 2010, en el cual llevaron a cabo la oxidación catalítica de benceno mediante un óxido de perovskita base lantano (LaMnO_3). Esta perovskita demostró tener mayor actividad oxidativa del benceno que sus homólogos LaCoO_3 y LaFeO_3 , debido a su mayor área superficial (Einaga y col., 2010).

Recientemente, Pan y colaboradores reportaron la completa remoción de tolueno empleando catalizadores tipo perovskita-dobles. Estos materiales en su estructura tienen presencia de dos metales de transición y su fórmula general se representa $\text{A}_2\text{B}'\text{B}''\text{O}_6$. En su trabajo, Pan comparó las perovskitas simples y dobles, demostrando que las dobles tienen una alta actividad en la remoción del tolueno, especialmente la perovskita $\text{La}_2\text{CoMnO}_6$. También fue reportado que con esta perovskita es posible remover algunos compuestos orgánicos volátiles como el isopropanol, etanal y etileno, lo cual coloca a las perovskitas como materiales muy prometedores para la remoción de contaminantes orgánicos volátiles, así como para aplicaciones industriales relacionadas con la disminución de contaminantes (Pan y col., 2018).

Otro de los contaminantes del aire que ha generado un enorme daño ambiental es el monóxido de carbono (CO), el cual es un gas (incolore e inodoro) que se forma por la combustión incompleta de material orgánico. La fuente principal de CO es la quema de combustibles fósiles; aunque este proceso ayuda a la humanidad en la generación de energía y calor, también tiene un efecto adverso provocando gran daño en la capa de ozono, favoreciendo el efecto invernadero y produciendo la lluvia

ácida. Yuan en 2021 publicó la síntesis mediante pirólisis por aspersión de llama (siglas en inglés, FSP) de una perovskita soportada en cobre (CuO-SrTiO_3). Esta perovskita al tener presencia de cobre en su estructura, tiene gran potencial en la combustión catalítica del CO y del metano (CH_4), para producir CO_2 (dióxido de carbono) y agua. Los resultados experimentales realizados por este equipo de trabajo demostraron que la eficiencia catalítica de la perovskita base cobre CuO-SrTiO_3 es mayor que la del SrTiO_3 puro y que al incrementar la carga del cobre, se incrementa la conversión de CO y CH_4 en CO_2 y H_2O , respectivamente. Además, realizaron un estudio teórico mediante simulación computacional utilizando la teoría del funcional de densidad (conocido por sus siglas en inglés, DFT), para explorar los efectos del soporte SrTiO_3 sobre la actividad catalítica y los mecanismos de reacción subyacentes, con lo cual, observaron una evidente acumulación de carga entre el titanio de la perovskita (SrTiO_3) y el oxígeno del cobre (CuO), incrementando la dispersión del cobre en el soporte y en general la actividad catalítica de la perovskita base cobre (CuO-SrTiO_3). Un esquema de la síntesis de SrTiO_3 por pirólisis y su correspondiente modelo computacional se pueden observar en la Figura 6.

Las perovskitas soportadas en cobre poseen un potencial significativo como catalizadores activos para la combustión catalítica, debido a su bajo costo, sobresaliente estabilidad térmica, y extraordinaria adaptabilidad de elementos de soporte, lo cual las convierte en materiales muy prometedores como auxiliares en la disminución de los niveles de contaminación y su estudio mediante experimentos (Koo y col., 2022), mediante simulación (Clabel y col., 2022) ó ambos (Yuan y col., 2021) ayudaran a encontrar maneras de disminuir el problema de la contaminación ambiental.

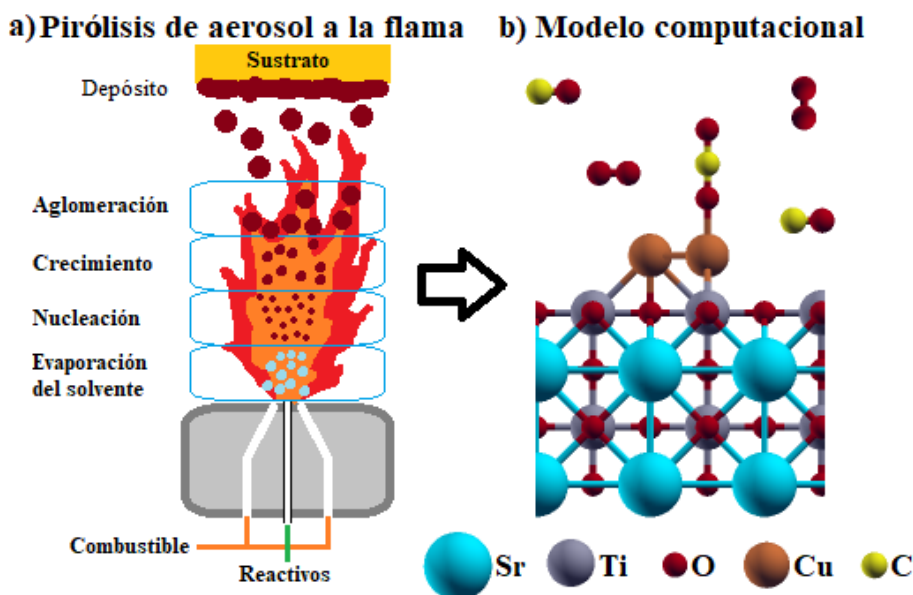


Figura 6. Representación esquemática de la síntesis de perovskita base Cobre CuO-SrTiO₃ (a) y su uso como catalizador en la combustión catalítica del CO y CH₄ (b).
 Fuente: Elaboración propia

La eliminación de contaminantes presentes en el agua es también un tema de gran relevancia, ya que el agua es un elemento vital para los seres humanos y el medio ambiente. Actualmente, una gran parte del agua disponible se encuentra contaminada por residuos industriales (textiles, alimentos, automotrices, farmacéuticos, etc.) y algunos de estos contaminantes son tóxicos para la vida acuática e inclusive agentes carcinógenos para el ser humano.

Una excelente alternativa para tratar los desechos acuosos y eliminar contaminantes presentes en desechos acuosos antes de ser mezclados con una corriente natural de agua, es el proceso de oxidación avanzada (siglas en inglés, AOP), es una técnica que hace uso de la oxidación de los contaminantes del agua con el radical hidroxilo (OH[•]). Dentro de las técnicas AOP más prometedoras se encuentra la fotocatalisis que se basa en el uso de energía solar para tratar los desechos acuosos. Para eliminar contaminantes mediante fotocatalisis, la aplicación de perovskitas en la degradación de contaminantes orgánicos en agua

es una técnica que ha tenido amplio desarrollo en los últimos años ya que ha demostrado ser efectiva y eficiente en el tratamiento de agua residuales.

En 2018 el investigador de la India, Ramesh Gade, reportó el uso de materiales perovskitas del tipo titanatos con sodio, plata y cobre para la degradación de tintas orgánicas y residuos industriales bajo irradiación de luz visible. El proceso de degradación de las tintas fue evaluado por espectroscopía de masas, encontrando que después de 1 hora de irradiación, los fragmentos de la tinta ya no eran visibles por esta técnica. Al término del proceso de degradación se determinó que los desechos acuosos presentaban un valor muy cercano al estándar en la prueba Demanda Química de Oxígeno (por sus siglas en inglés, COD) (Gade y col., 2018). A la hora de diseñar nuevos materiales, se realizan experimentos en donde se estudian las propiedades, aplicaciones y eficiencia de los mismos. Pero también, son necesarias teorías que expliquen el por qué se presentan determinados comportamientos. Analizar el comportamiento de los materiales nos puede ayudar a predecir las propiedades de materiales similares. Existen métodos, ampliamente utilizados en el estudio de propiedades de materiales, basados solamente en modelos de la mecánica cuántica y la mecánica estadística, estos son conocidos como métodos *ab initio*. Uno de los métodos más utilizados es la teoría del funcional de la densidad (mejor conocido por sus siglas en inglés, DFT), debido a que es una poderosa herramienta para cálculos del estado cuántico de átomos, moléculas, sólidos y dinámica molecular. Las matemáticas correspondientes para la obtención de soluciones de los métodos son complejas, motivo por el cual suelen utilizarse supercomputadoras o computadoras con múltiples procesadores para facilitar y agilizar la solución de las ecuaciones. En México, instituciones como el Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México perteneciente a la red de laboratorios nacionales CONACYT proveen horas cómputo para la solución de métodos como el DFT, a través de convocatorias de proyectos. La simulación computacional es una herramienta útil en el estudio de las propiedades de

materiales que pudieran emplearse en la remoción de agentes contaminantes del medio ambiente utilizando adsorbentes o catalizadores entre los cuales se encuentran como buenos candidatos varios compuestos de la familia de las perovskitas (Ye y col., 2022; Mondal y col., 2017)

Conclusiones

En conclusión, la generación y acrecentamiento de los problemas asociados con la contaminación son derivados de un crecimiento desmedido de la industrialización. Esto trae problemas ambientales y de salud, razón por la cual se están dedicando muchos esfuerzos para eliminar los contaminantes del aire y del agua principalmente. Varias propuestas se han presentado entre las que destacan el uso de materiales tipo perovskita para la remoción de sustancias dañinas. De los cuales las aproximaciones existentes son tanto experimentales como teóricas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México perteneciente a la red de laboratorios nacionales CONACYT, por los recursos computacionales, el apoyo y la asistencia técnica, proporcionados a través del proyecto 202103076N.

Referencias Bibliográficas

Clabel, H. J. L., Chacaliza-Ricaldi, J., Marega E. (2022). Potential Application of Perovskite Structure for Water Treatment: Effects of Band Gap, Band Edges, and Lifetime of Charge Carrier for Photocatalysis. *Front. Nanotechnol.* 4: 827925.

Einaga, H., Hyodo, S., Teraoka Y. (2010). Complete Oxidation of Benzen Over Perovskite-Type Oxide. *Top Catal.* 53: 629-634.

Gade, R., Ahemed, J., Lakshmi K., Yimer, S., Tao, Y., Pola, S. (2018). Photodegradation of organic dyes and industrial wastewater in the presence of layer-

type perovskite materials under visible light irradiation. *J. of Environ. Chem. Eng.* 6: 4504-4513.

Gove, H.M., Department for environment food & rural affairs (2019). Clean air strategy 2019. [En línea]. Disponible en: www.gov.uk/government/publications. Fecha de consulta: 7 de septiembre de 2021.

Greenpeace (2021). ¿Cómo afectan los combustibles fósiles a la salud humana? [En línea]. Greenpeace México. Disponible en: <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/9853/como-afectan-los-combustibles-fosiles-a-la-salud-humana/>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2022.

INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero#:~:text=Inventario%20Nacional%20de%20Emisiones%20de%20Gases%20y%20Compuestos%20de%20Efecto%20Invernadero%202013&text=En%20M%C3%A9xico%20las%20emisiones%20totales,de%20665%20304.92%20Gg%20de%20CO2e>. Fecha de consulta: 13 de junio de 2022.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Demografía y Sociedad. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2022.

Jin, L., Apte, J., Wang, S., Miller, S., Tao, S., Jiang, G., Li, X. (2022). Global endeavors to address the health effects of urban air pollution. *Environ. Sci. Technol.* 56: 6793-6798.

Koo, P.L., Jaafar, N. F., Yap, P.S., Oh, W.D. (2022). A review on the application of perovskite as peroxymonosulfate activator for organic pollutants removal. *J. Environ. Chem. Eng.* 10: 107093.

Lamsal, L.N., Martin R.V., Parrish, D.D., Krotkov, N.A. (2013). Scaling relationship for NO₂ pollution and urban population size: a satellite perspective. *Environ. Sci. Technol.* 47: 7855-7861.

Mondal, I., Srikanth, M., Srinivasu, K., Soujanya, Y., Pal, U. (2017). Understanding the Structural and Electronic Effect of Zr⁴⁺-Doped KNb(Zr)O₃ Perovskite for Enhanced Photoactivity: A Combined Experimental and Computational Study. *J. Phys. Chem. C.* 121: 2597-2604.

Pan, L.K., Pan, G.T., Chong, S., Chang, M.B. (2018). Removal of VOCs from gas streams with double perovskite-type catalysts. *J. Environ. Sci.* 69: 205-2016.

Ponraj, C., Vinitha, G., Daniel, J. (2017). A review on the visible light active BiFeO₃ nanostructures as suitable photocatalyst in the degradation of different textiles dyes. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 7: 110-120.

Rao, Y., Zhang, Y., Han, F., Guo, H., Huang, Y., Li, R., Qi, F., Ma, J. (2018). Heterogeneous activation of peroxymonosulfate by LaFeO₃ for diclofenac degradation: DFT-assisted mechanistic study and degradation pathways. *Chem. Eng. J.* 352: 601-611.

Riojas, H. (2013). La salud ambiental en México: situación actual y perspectivas futuras. *Salud Pública de México.* 55 (6): 638-649.

Ropero, S. (2020). Impacto ambiental de los combustibles fósiles. [En línea]. Ecología Verde. Disponible en: <https://www.ecologiaverde.com/impacto-ambiental-de-los-combustibles-fosiles-3191.html>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2022.

SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2019). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México Edición 2018. [En línea]. Disponible en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>

Fecha de consulta: 10 de junio de 2022

SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2016). Resumen Ejecutivo. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México Edición 2015. [En línea]. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Resumen15_ejecutivo.pdf. Fecha de consulta: 10 de junio de 2022.

Vargas, F. (2005). La contaminación ambiental como factor determinante de la salud. *Rev. Esp. Salud Pública*. 79: 117-127.

Ye, Q., Liu, C., Wu, P., Wu, J., Lin, L., Li, Y., Ahmed, Z., Rehman, S., Zhu, N. (2022). Insights into photocatalytic degradation of phthalate esters over MSnO_3 perovskites (M= Mg, Ca): Experiment and density functional theory. *J. Environ. Manage.* 307: 114511.

Yuan, X., Meng, L., Xu, Z., Zheng, C., Zhao H. (2021). CuO Quantum Dots Supported by SrTiO_3 Perovskite Using the Flame Spray Pyrolysis Method: Enhanced Activity and Excellent Thermal Resistance for Catalytic Combustion of CO and CH_4 . *Environ. Sci. Technol.* 55: 14080-14086.

Zang, M., Zhao, C., Wang, Y., Chen, S. (2019). A review of recent advances in catalytic combustion of VOCs on perovskite-type catalyst. J. Saudi Chem. Soc. 23: 645-654.