

## Decoloración del AM en presencia de las películas compuestas de PVP y un óxido metálico

# Boletín de la Sociedad Química de México (Bol. Soc. Quim. Mex.)

## EDITORES

Dra. Mariana Ortiz Reynoso  
Dr. Martín Caldera Villalobos  
Dra. Mariana Esquivelzeta Rabell

## COMITÉ EDITORIAL

Dra. Catalina Pérez Berumen  
Dra. Liliana Schifter Aceves  
Dra. Miriam Verónica Flores Merino  
Mtra. Itzayana Pérez Álvarez  
Mtra. Edna Teresa Alcantara Fierro  
Dr. Miguel Ángel Méndez Rojas  
Dr. Gonzalo Martínez Barrera  
Dr. Joaquín Barroso Flores  
Dr. Marcos Hernández Rodríguez  
D. Rogelio Godínez Reséndiz  
Dr. Rubén Vásquez Medrano  
Mtra. Carmen Doria Serrano



## MAQUETACIÓN

Estefanie Luz Ramírez Cruz  
es.ramirezacruz@gmail.com

## CONTACTO BSQM

boletin.sqm@gmail.com  
Sociedad Química de México, A.C.

**EN PORTADA:** Decoloración del AM en presencia de las películas compuestas de PVP y óxido metálico. Fotografía: Julia Liliana Rodríguez Santillán, Ricardo Santillán Pérez, Iririana Martínez Sánchez, "Vinilpiridinas: la maravilla de las películas fotoactivas". pág. 31

## DERECHOS DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS

El Boletín de la Sociedad Química de México, año 19, número 2, mayo-agosto de 2025, es una publicación cuatrimestral, mayo-agosto 2025, editada por la Sociedad Química de México, A.C., Barranca del Muerto 26, Col. Crédito del Constructor, Alc. Benito Juárez, 03940, Ciudad de México, Tel. 55 56 62-68 37. <http://bsqm.org.mx/>, [boletin.sqm@gmail.com](mailto:boletin.sqm@gmail.com). Editora responsable Mariana Ortiz. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2017-063013203100-203, ISSN-e: 2594-1038, ambos otorgados por Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este número Estefanie Ramírez. Fecha de última modificación: 31 de agosto de 2025.

Estimados lectores,

Es un gusto presentarles el segundo número del Boletín de la Sociedad Química de México del año 2025. Cada edición de esta publicación es un trabajo colectivo que ilustra el quehacer de nuestra comunidad. Este número es un recorrido que va desde un debate histórico sobre la naturaleza de la materia hasta la búsqueda de soluciones a problemas contemporáneos como la contaminación del agua, las amenazas invisibles para la salud y la necesidad de una economía circular. En este sentido, cada contribución que encontrarán en las siguientes páginas nos muestra cómo la química se reafirma como una fuerza de cambio, impulsada por la curiosidad y el compromiso con el bienestar. Esperamos que todas las secciones sean de su agrado.

La historia de la química está llena de momentos de inflexión y en México, uno de los más notables fue el que se desató con la llegada de los postulados de Antoine-Laurent de Lavoisier. El artículo de Elda Gabriela Pérez Aguirre titulado "La polémica en torno a la nomenclatura de Lavoisier en México" explora esta historia, recordándonos que la asimilación de la química moderna en nuestro país fue un proceso acelerado y complejo, catalizado por factores como la larga tradición minera y metalúrgica, la llegada de expediciones científicas y las Reformas borbónicas.

La naturaleza de los desafíos que enfrentamos hoy exige que la química trascienda los muros del laboratorio para incidir directamente en el bienestar de la sociedad. Los artículos de este número abordan tres de los problemas más apremiantes de nuestro tiempo: los contaminantes genotóxicos. En ellos incide el trabajo de revisión de Alexa Dahé Ortiz Del Collado y Francisco Hernández-Luis, que se enfoca en uno de los grupos de compuestos más estudiados en este ámbito: los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). El segundo y el tercero, la contaminación del agua y la crisis de las emisiones de dióxido de carbono. Dos artículos demuestran la capacidad de la disciplina para transformar problemas en oportunidades, ya sea a través de la degradación de contaminantes o mediante la conversión de gases de efecto invernadero en productos valiosos. La nota científica presentada por Julia Liliana Rodríguez Santillán, Ricardo Santillán Pérez e Iririana Martínez Sánchez, titulada "Vinilpiridinas: la maravilla de las películas fotoactivas", aborda la urgencia del tratamiento de agua en un país como México.

Complementando esta visión de la química como herramienta ambiental, el trabajo de Jesús Alonso Cruz Valdez y sus colaboradores es una revisión bibliográfica titulada "Carbonatos cíclicos: aprovechamiento del CO<sub>2</sub> en la obtención de solventes verdes". Explora la síntesis de carbonatos cíclicos destacados y el panorama de mercado actual para sus aplicaciones. Estos son catalogados como solventes verdes por su baja toxicidad, alta biodegradabilidad y bajo costo de producción.

Los artículos de este número nos invitan a reflexionar sobre la química como una disciplina en constante evolución. Desde la discusión sobre un nombre histórico hasta la creación de disolventes ecológicos para combatir el cambio climático, se puede ver que el éxito de nuestra ciencia depende de la habilidad de nuestra comunidad para conectar la investigación avanzada con las necesidades de la sociedad.

La Sociedad Química de México, a través de sus congresos, publicaciones y redes, se compromete a ser el epicentro de este diálogo. De nuevo les recuerdo que pueden afiliarse y ser parte de la Sociedad Química de México y les invitamos a leer con curiosidad, a cuestionar y a contribuir. Porque en cada desafío, se reafirma que "la química nos une".

Dra. Mariana Esquivelzeta Rabell  
Colegio Madrid A.C.  
Editora

# CONTENIDO



## **QUÍMICA Hoy**

Felicitación de la Sociedad Química de México a Investigadores Eméritos del SNII recién nombrados 4

Congreso Virtual de Docencia en Química  
"Educación Química sin fronteras: enseñando para el futuro"  
*Numeralia* 5

Convocatoria  
Congreso Internacional de la Sociedad Química de México 2025 y  
6o Congreso Internacional de Educación Química  
"Química Inteligente para un Entorno Sostenible" 7

Convocatoria  
2nd Latin-American School on  
Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes 12

Bioactivación enzimática de hidrocarburos aromáticos policíclicos:  
una vía clave hacia la carcinogénesis mediada por Citocromo P450  
*Alexa Dahé Ortiz Del Collado, Francisco Hernández-Luis* 17

La polémica en torno a la nomenclatura de Lavoisier en México  
*Elda Gabriela Pérez Aguirre* 22

## **QUÍMICA, DESARROLLO Y SOCIEDAD**

Carbonatos cíclicos: aprovechamiento del CO<sub>2</sub> en la  
obtención de solventes verdes 25  
*Jesús Alonso Cruz Valdez, Valvanuz Cahuantzi, Rosalba Patiño-Herrera y José Elías Pérez López*

## **QUÍMICA PARA LOS ESTUDIANTES**

Nota Científica 30  
*Julia Liliana Rodríguez Santillán, Ricardo Santillán Pérez y Iririana Martínez Sánchez*

La Sociedad Química de México, A.C.  
FELICITA A



**Dra. Violeta Mugica Álvarez**  
Profesora Titular de Carrera Nivel C e  
Investigadora del Departamento de Ciencias  
Básicas e Ingeniería de la UAM-Azcapotzalco



**Dra. Elisa Leyva Ramos**  
Profesora-Investigadora de la  
Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP



**Dr. Roberto Leyva Ramos**  
Profesor-Investigador de la  
Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP

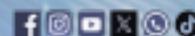


**Dr. J. Francisco Delgado Reyes**  
Profesor-Investigador de la  
Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN

Por su reciente distinción como **Investigador(a) Nacional Emérito(a)**, máximo nombramiento que otorga el **Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras**.

[www.sqm.org.mx](http://www.sqm.org.mx)

Publicado 26 de agosto de 2025  
"La química nos une"



"La Química Nos Une"



SOCIEDAD QUÍMICA  
DE MÉXICO, A.C.



# CONGRESO VIRTUAL DE DOCENCIA EN QUÍMICA

“Educación Química sin fronteras:  
enseñando para el futuro”

2 AL 5 DE JULIO DE 2025



congresos@sqm.org.mx | www.sqm.org.mx

“química más una”



CONGRESO VIRTUAL DE  
DOCENCIA  
EN QUÍMICA  
2 AL 5 DE JULIO DE 2025

## NUESTROS PONENTES



Dr. José de Jesús Rodríguez Sánchez  
Profesor de Tecnología Educativa, Educación  
a Distancia, Tecnológico de Estudios Superiores  
de Tacámbaro, Tlaxcala, México



Mrs. José Luis Cervillo Ramírez  
Responsable, Sistema de Educación  
Digital, Universidad de Querétaro



Lic. Biología Elena Pineda Jurado  
Cátedra de Química, Universidad “Pablo  
de Olaverri”, Universidad Nacional Autónoma de México



Mrs. Kira Patricia Nájera  
Facultad de Química, Universidad  
Nacional Autónoma de México



Mrs. Roberto Correa Yala  
Cátedra de Química, Universidad Politécnica  
de Toluca, Universidad Nacional Autónoma de México



Lic. en Q. Mónica Simón Palacios  
Cátedra de Química, Universidad Politécnica  
de Toluca, Universidad Nacional Autónoma de México



Dr. Francisco Javier Álvarez Torres  
División de Ciencias Naturales y  
Químicas, Universidad de Querétaro



Dr. Juan Antonio Sánchez Méndez  
Colegio de Nivel Medio Superior,  
Universidad de Querétaro



Mrs. Sara Vega Rodríguez  
Facultad de Ciencias Químicas,  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí



Mrs. Luc Brizosa de León Lora  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí



Lic. en Q. Mauricio Pavoni Ponce  
Facultad de Química, Universidad  
Autónoma de San Luis Potosí



Lic. en Q. Verónica Cortés Olvera  
Cátedra de Química, Universidad Politécnica  
de Toluca, Universidad Nacional Autónoma de México



Lic. J. Maribel Roblero García  
Cátedra de Química, Universidad Politécnica  
de Toluca, Universidad Nacional Autónoma de México



Lic. en Q. Erika Velasco Rodríguez  
Facultad de Química, Universidad Politécnica  
de Toluca, Universidad Nacional Autónoma de México



Dr. Erik Pérez Ramírez  
Escuela Superior de Química, Universidad  
Nacional Autónoma de México



Mrs. Yolanda María Vargas Rodríguez  
Facultad de Química, Universidad Politécnica  
de Toluca, Universidad Nacional Autónoma de México



congresos@sqm.org.mx | www.sqm.org.mx



Lic. Adolfo Eduardo Olvera Valderrama  
Facultad de Química, Universidad Politécnica  
de Toluca, Universidad Nacional Autónoma de México



Lic. María del Carmen Tenorio Chávez  
Cátedra de Química, Universidad Politécnica  
de Toluca, Universidad Nacional Autónoma de México



Lic. Elena Ramos Pineda  
Cátedra de Química, Universidad Politécnica  
de Toluca, Universidad Nacional Autónoma de México

“química más una”





Dr. José de Jesús Rodríguez Sánchez  
Docente de Tecnología Química, Educación  
a Distancia, Seminario Avanzado, UNEDP



Mrs. José Luis Castillo Ramos  
Responsable, Sistema de Educación  
Digital, Universidad de Guanajuato



Lic. Biología Elena Mónica Jurado  
Código de Ética y Convenciones, Pases  
Técnicos, Universidad Nacional Autónoma de México



Dra. Ana Patricia Vázquez  
Facultad de Química, Universidad  
Nacional Autónoma de México



Mtro. Roberto Correa Tello  
Jefe de Laboratorio de Química, Facultad  
de Ingeniería Química, UNAM



Sr. M. D. Mónica Gómez Padilla  
Código de Ética y Convenciones, Pases  
Técnicos, Universidad Nacional Autónoma de México



Dr. Francisco Javier Álvarez Torres  
Dirección de Ciencias Naturales y  
Sociales, Universidad de Guanajuato



Dr. Juan Antonio Sánchez Velasco  
Colegio de Nivel Medio Superior,  
Universidad de Guanajuato



Dra. Sara Vega Rodríguez  
Facultad de Ciencias Químicas,  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí



Dra. Luc Brizana de León Lomel  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí



Sr. M. D. Mauricio Fernández Pérez  
Facultad de Medicina, Universidad  
Autónoma de San Luis Potosí



Sr. M. D. Verónica García Olvera  
Código de Ética y Convenciones, Pases  
Técnicos, Universidad Nacional Autónoma de México



Lic. B. Marcela Roblero García  
Código de Ética y Convenciones, Pases  
Técnicos, Universidad Nacional Autónoma de México



Lic. M. P. Erika Velasco Rodríguez  
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional  
Autónoma de México



Dr. Erik Pérez Ramírez  
Escuela Nacional Superior de Química, UNAM  
Nacional Autónoma de México



Dra. Yarema María Trujillo Rodríguez  
Facultad de Estudios Superiores - Cuautitlán,  
Universidad Nacional Autónoma de México

¡Muchas  
GRACIAS!



Dr. Adolfo Eduardo Olvera Valdivia  
Facultad de Ciencias Experimentales, Cuautitlán,  
Universidad Nacional Autónoma de México



Lic. María del Carmen Tenorio Chávez  
Código de Ética y Convenciones, Pases  
Técnicos, Universidad Nacional Autónoma de México



Erika Elena Ramos Plascencia  
Código de Ética y Convenciones, Pases  
Técnicos, Universidad Nacional Autónoma de México

## NUMERALIA

- 31 Trabajos programados
- 23 Presentaciones orales
- 8 Carteles
- 108 Congresistas
- 28 Ponentes
- 48 Asistentes
- 19 Conferencistas
- 8 Moderadores
- 10 becados

- 4 días de actividad
- 16 actividades
- 1 Sesión de Presentación de Carteles
- 4 Sesiones de Presentaciones Orales
- 2 Conferencias Magistrales
- 2 Simposios
- 1 Mesa Redonda
- 4 Talleres
- 1 Actividad recreativa
- 1 Mesa de Conclusiones



SOCIEDAD QUÍMICA  
DE MÉXICO A.C.  
*"La química nos une"*

# CONGRESO INTERNACIONAL DE LA SOCIEDAD QUÍMICA DE MÉXICO 2025

Y

## 6° CONGRESO INTERNACIONAL DE EDUCACIÓN QUÍMICA

*"Química Inteligente para un Entorno Sostenible"*

# FECHA LÍMITE PARA RECEPCIÓN DE TRABAJOS 29 DE AGOSTO

14|15|16|17  
OCTUBRE 2025

ExpoQUÍMICA

2nd Latin-American School on Environmental Applications of  
Advanced Oxidation Processes

Sede Monterrey, Nuevo León  
Hotel NH Collection Monterrey San Pedro

### Temáticas

#### CISQM2025

- Bioquímica
- Bioteología
- Catalisis
- Electroquímica
- Fisicoquímica
- Química Ambiental
- Química Analítica
- Química Bioinorgánica
- Química de Coloides y Superficies
- Química de Materiales
- Química de Polímeros
- Química Inorgánica
- Química Medicinal
- Química Metalúrgica
- Química Nuclear
- Química Orgánica
- Química Organometálica
- Química Supramolecular
- Química Sustentable/Verde
- Química Teórica y Computacional

#### 6° CIEQ

- Experiencias de Divulgación-Educación
- Reflexión sobre las buenas prácticas educativas
- Experiencias de enseñanza
- Investigación educativa y didáctica de la química en general
- Ideas centrales de la química y su enseñanza
- Evaluación de los aprendizajes
- Reflexión e innovación en la formación de profesores y mejora continua de la práctica docente
- Cultura, comunicación científica y divulgación de la química

### Actividades

- Plenarias
- Mesas de Diálogo
- Mesas de Discusión
- Simposios
- Talleres
- Carteles: Estudiantiles y Profesionales
- Presentaciones Orales

### Más información

- [www.sqm.org.mx](http://www.sqm.org.mx)
- [congresos@sqm.org.mx](mailto:congresos@sqm.org.mx)
- + (52) 555662 6837 y + (52) 555662 6823



### Cuotas Socios Activos

	Pago Oportuno (Abril-Agosto)	Pago Tardío (Septiembre-Octubre)
Profesionistas y académicos	\$3,600.00 M.N.	\$3,900.00 M.N.
Profesor de Educación Media Superior	\$2,700.00 M.N.	\$3,000.00 M.N.
Estudiante de Posgrado	\$2,700.00 M.N.	\$3,000.00 M.N.
Estudiante de Pregrado	\$1,800.00 M.N.	\$2,100.00 M.N.
Mayores de 65 años / Jubilados / Emeritos	\$2,600.00 M.N.	\$2,900.00 M.N.
Sesión por un día	\$1,500.00 M.N.	\$1,600.00 M.N.

### Cuotas No Socios

	Pago Oportuno (Abril-Agosto)	Pago Tardío (Septiembre-Octubre)
Profesionistas y académicos	\$6,000.00 M.N.	\$6,400.00 M.N.
Profesor de Educación Media Superior	\$4,500.00 M.N.	\$4,900.00 M.N.
Estudiante de Posgrado	\$4,500.00 M.N.	\$4,900.00 M.N.
Estudiante de Pregrado	\$2,800.00 M.N.	\$3,200.00 M.N.
Mayores de 65 años / Jubilados / Emeritos	\$4,300.00 M.N.	\$4,700.00 M.N.
Sesión por un día	\$1,700.00 M.N.	\$1,800.00 M.N.



*"La química nos une"*





## CONVOCATORIA.

### Congreso Internacional de la Sociedad Química de México 2025 y 6º Congreso Internacional de Educación Química

La Sociedad Química de México,  
CONVOCA al

#### Introducción

En los últimos años, la Química enfrenta retos, desafíos y presiones como nunca antes. Se espera que la Química resuelva las necesidades y problemas emergentes de la sociedad en el menor tiempo posible, de manera segura y ética. Para lograrlo, la Química debe ser más interdisciplinaria para que la innovación surja de las fronteras de las áreas tradicionales, donde la construcción de los nuevos campos se centren en problemas de creciente complejidad. La naturaleza de la investigación, las estructuras organizativas y la enseñanza deben buscar nuevas rutas adoptando los avances tecnológicos que vuelven a la Química más automatizada, remota y modular. La Sociedad Química de México busca ser el espacio donde se reflexione sobre la frontera y la interdisciplinariedad de la Química en México por que invitamos a toda la comunidad de estudiantes investigadores, docentes y divulgadores a participar activamente en los diálogos sobre el futuro de la Química y de su enseñanza en el Congreso Nacional 2025.

#### Objetivos

- **Reunir** a estudiantes, docentes, investigadores e interesados en la comunicación efectiva de la química para intercambiar ideas, teorías, estrategias y experiencias alrededor de la investigación, la divulgación y la educación.
- **Compartir** experiencias para abordar enfáticamente la actualidad de la química en México y el mundo, sus quehaceres y sus beneficios para la humanidad.
- **Conocer** nuevas herramientas para desarrollar la investigación química y aplicarlas en procesos de divulgación y docencia.
- **Difundir** las tendencias y prácticas en innovación de la divulgación en química que contribuyen a transformar su percepción en el mundo.

#### Categorías de participación

Los interesados podrán asistir al congreso en dos categorías:

- **Ponente:** Personas que participan en las actividades del congreso y que presentan uno o más trabajos en modalidad oral y/o cartel.
- **Asistente:** Personas que participan en las actividades del congreso, que no presentan trabajo.

#### Tipos de contribución:

- **Presentación Oral:** Se proporciona un espacio para que, en 12 minutos, el (la) expositor (a) presente los detalles del trabajo sometido al congreso. Se darán 3 minutos para resolución de preguntas de la audiencia. Se pueden utilizar herramientas como: PPT y/o PDF.
- **Cartel o Poster:** Se proporciona un espacio destinado para la presentación de un cartel que contenga los detalles del trabajo sometido al congreso.

#### Áreas de recepción de trabajos

Congreso Internacional de la  
Sociedad Química de México 2025

- Bioquímica- BIOQ
- Biotecnología- BTEC
- Catálisis- CATL
- Electroquímica- ELEQ
- Físicoquímica- FISQ
- Química Ambiental- QAMB

- Química Analítica – QANA
- Química Bioinorgánica- QBIN
- Química de Alimentos- QALI
- Química de Coloides y Superficies- QCYS
- Química de Materiales- QMAT
- Química de Polímeros- QPOL
- Química de Productos Naturales- QPNT
- Química Inorgánica- QINO
- Química Medicinal- QMED
- Química Metalúrgica- QMET
- Química Nuclear- QNUC
- Química Orgánica- QORG
- Química Organometálica- QOME
- Química Supramolecular- QSM
- Química Sustentable / Verde- QSUS
- Química Teórica y Computacional- QTyC

#### 6º Congreso Internacional de Educación Química

- Experiencias de Divulgación-Educación (EDE)
- Reflexión sobre las buenas prácticas educativas (BPE)
- Experiencias de enseñanza (EE)
- Investigación educativa y didáctica de la química en general (IED)
- Ideas centrales de la química y su enseñanza (ICQE)
- Evaluación de los aprendizajes (EA)
- Reflexión e innovación en la formación de profesores y mejora continua de la práctica docente (Rel).
- Cultura, comunicación científica y divulgación de la química (CCD)

**De acuerdo con su categoría de participación, los congresistas tendrán derecho a:**

Participar en las actividades académicas: Aquellas que forman parte del programa del evento.

Constancia digital: Recibirán constancia de asistencia aquellas personas que hayan cumplido con el 80% de su asistencia al congreso (el sistema pasará lista automáticamente), adicionalmente, aquellos ponentes que hayan presentado su(s) trabajo(s) recibirán una constancia como expositores de acuerdo con su tipo de contribución.

Publicación: Todos los trabajos serán evaluados y en caso de ser aceptados serán publicados (previa autorización del ponente) en la Colección de Memorias de los Congresos de la Sociedad Química de México (CMCSQM), que cuentan con ISSN. La publicación se llevará a cabo siempre y cuando el autor haya tomado en cuenta los comentarios de los evaluadores y cumpla con los lineamientos de la publicación.

**Modalidad de participación:**

**Presencial (única):**

Sede: Hotel NH Collection Monterrey San Pedro.

Es obligatorio portar el gafete de los Congresos todo el tiempo, de no hacerlo le será requerido y se podría negar el acceso a las salas de conferencia.

**Idioma:**

**Español / Inglés**

Algunas conferencias invitadas serán dictadas en Inglés.

Se solicita a los congresistas ponentes de presentaciones orales que sus diapositivas o material se encuentre en Inglés y que su exposición se lleve a cabo en el idioma de su preferencia (Español / Inglés).

NOTA: No se cuenta con sistema de traducción simultánea.

**Cuotas de Inscripción**

Evento	CISQM2025 + 6° CIEQ	CISQM2025 + 6° CIEQ	2 <sup>nd</sup> LASAOPs + CISQM2025 + 6° CIEQ	2 <sup>nd</sup> LASAOPs + CISQM2025 + 6° CIEQ
Fechas	14-17 de octubre	14-17 de octubre	12-17 de octubre	12-17 de octubre
Categoría*	NO socios SQM	Socios Activos SQM	NO Socios SQM	Socios Activos SQM
Profesionistas y Académicos	\$6,000.00	\$3,600.00	\$8,000.00	\$5,600.00
Profesor de Educación Media Superior	\$4,500.00	\$2,700.00	\$6,500.00	\$4,700.00
Estudiante de Posgrado	\$4,500.00	\$2,700.00	\$6,250.00	\$4,450.00
Estudiante de Pregrado	\$2,800.00	\$1,800.00	\$4,050.00	\$3,050.00
Mayores de 65 años / Jubilados / Eméritos	\$4,300.00	\$2,600.00	\$6,300.00	\$4,600.00
Sesión por un día	\$1,700.00	\$1,500.00	NO APLICA	NO APLICA

**NOTAS:**

- \*Se debe presentar un comprobante de pertenencia de categoría.
- \*\*Aquellos asociados que cubrieron su cuota de inscripción 2025.
- Cuotas expresadas en Moneda Nacional.
- La cuota de inscripción da derecho a registrar hasta 2 trabajos por persona.
- La cuota de inscripción es intransferible.
- Si está interesad@ en registrar más trabajos será necesario cubrir nuevamente la cuota de inscripción por cada par de trabajos.
- Se debe cubrir el monto de inscripción previo al registro del(la) congresista como asistente o ponente (envío de trabajos).
- La cuota de inscripción no incluye la membresía a la SQM.
- Para más información sobre la 2<sup>nd</sup> Latin-American School on Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes, visite: <https://sqm.org.mx/ii-lasaops/>
- Si usted cubre su cuota de inscripción a los Congresos de la SQM y la 2<sup>nd</sup> LASAOPs es importante que llene su registro al segundo evento ingresando a la página web mencionada anteriormente.



**Concurso Nacional de Carteles Estudiantiles (CNCE)**

**DEFINICIÓN:**

Es una oportunidad para que los estudiantes de bachillerato o licenciatura presenten el resultado de su trabajo, coadyuvando con su

formación académica y desempeño ante públicos especializados. Cada sesión será evaluada por uno o varios profesores(as)/ investigadores(as) conocedores del área a evaluar.

#### **BASES:**

1. Participarán los trabajos cuyos autores sean estudiantes del área Química de bachillerato, licenciatura y en proceso de titulación.

2. Durante la presentación del Cartel es estricta responsabilidad del ponente permanecer frente a su trabajo en el lugar y horario asignado para su exposición y evaluación. Deberá atender a los cuestionamientos que en torno a su trabajo se le realicen. Aquellos que no se presenten en el lugar y horario designado no podrán participar en el CNCE.

3. En la parte inferior del Cartel deberán mencionarse los nombres de los profesores asesores.

4. Los trabajos propuestos deberán cumplir con los tres requisitos establecidos para la recepción de trabajos, que aparecen en la convocatoria respectiva, en la página de la Sociedad Química de México, A.C. (SQM): resumen, extenso e inscripción. Será indispensable anexar fotocopia del comprobante oficial que acredite su calidad y nivel como estudiante de bachillerato o de licenciatura.

5. La evaluación se realizará bajo los siguientes criterios:

–Marco teórico en el que se fundamenta el trabajo. Otros parámetros a evaluar:

- Metodología empleada.
- La relevancia, importancia e impacto para la química.
- Original, innovador e inédito.
- Discusión y análisis de resultados.
- Viabilidad de la propuesta.
- Presentación y defensa del Cartel que refleje originalidad, creatividad y enfoque adecuado para la solución de un problema.
- Pertinencia para algunas áreas de la Química.
- Fuentes confiables y fidedignas.
- Contenido y rigor metodológico.

6. Si un cartel resultara premiado y su autor principal no estuviera inscrito en los Congresos o su categoría de inscripción no es correspondiente, automáticamente quedará descalificado.

7. La Comisión encargada del Concurso Nacional de Carteles Estudiantiles (CNCE) de la SQM, nombrará a los evaluadores de sesión, quienes entregarán a la comisión del CNCE los formatos adecuadamente requisitados, incluyendo la recomendación de primer lugar y mención honorífica.

8. Sólo aquellos trabajos de bachillerato o licenciatura presentados en Cartel tendrán derecho a participar en el CNCE.

9. El ganador del primer lugar se hará acreedor a un diploma y a un reconocimiento económico. Los trabajos no ganadores, que hayan sido sugeridos por los evaluadores como candidatos a primer lugar, recibirán un diploma.

10. Al finalizar la sesión, los evaluadores deberán entregar un listado de los trabajos no presentados por el autor responsable. No se entregará constancia de presentación de trabajo.

11. La definición de los ganadores de primer lugar queda bajo la responsabilidad de la Comisión del CNCE de la SQM y es inapelable.

#### **Sede**

El hotel NH Collection Monterrey San Pedro, antes llamado NH Collection Monterrey, se encuentra en la exclusiva área de

San Pedro Garza García, cerca del centro comercial Paseo San Pedro, el más lujoso de Monterrey. Nuestros huéspedes pueden ir de compras a las tiendas de marcas o explorar atracciones como el Planetario Alfa y el parque de atracciones Plaza Sésamo, no muy alejadas del hotel. Los principales centros de convenciones, como Cintermex, CONVEX y el Parque Fundidora, también están ubicados por la zona.

#### **Ubicación:**

Av Jose Vasconcelos 402,  
66268 Monterrey  
Mexico

#### **Tarifas, Información y Reservas**

- Habitación sencilla y doble \$2,088.00 MXN
- Habitación triple \$2,436.00 MXN

NOTAS: 1. Las tarifas incluyen impuestos. 2. Las tarifas no incluyen desayuno. 3. Precios expresados en Moneda Nacional. 4. Las tarifas solo aplican en el hotel sede y no en alguno otro de la cadena o similar.

#### **Información del Hotel:**

##### **Política de Check-in y Check-out:**

- Check-in: 15:00 horas.
- Check-out: 12:00 horas.
- Check-out con Lazy Sunday: 15:00 horas.

##### **Política de Fumadores**

- 100% NO Fumador

##### **Información sobre el Parking**

- 7.00 USD por día
- El parking no admite reserva anticipada

##### **Política de Mascotas**

- Peso/altura máximos: 25 kg
- Precio: \$630.00 mxn por noche.
- Disponibilidad limitada, contacta con el hotel para reservar.
- Máximo 2 mascotas/habitación.

##### **Servicios**

- Wi-Fi gratis
- Estacionamiento
- Gimnasio
- 100% no fumador
- Aire acondicionado o climatizador
- Mascotas
- Accesibilidad
- Niñera
- Celebraciones
- Reuniones
- Habitaciones

##### **Dudas/Preguntas:**

Mauricio Vargas  
Tel. +525556626837 e-mail: [soquimex@sqm.org.mx](mailto:soquimex@sqm.org.mx)

##### **Reservaciones**

- Reserve ahora en el Hotel sede con las tarifas preferenciales antes mencionadas.
- Las tarifas preferenciales son únicamente para asistentes y acompañantes a los eventos organizados por SQM.
- Las tarifas están disponibles para reservaciones en el rango de fechas del 11-19 de octubre de 2025.

Reservaciones en línea: <https://www.nh-hotels.com/es/eventsweb/congreso-sociedad-quimica>

Cronograma:

- Inicio de la convocatoria: 11 de julio.
- Fecha límite de recepción de trabajos: 29 de agosto a las 23:59 horas (hora de la CDMX).
- Fecha límite para envío de cartas de evaluación con aceptación/rechazo: 15 de septiembre.
- Fecha límite de recepción de modificaciones y correcciones para memorias y programación de trabajo: 26 de septiembre.
- Fecha límite de pago para asegurar la programación de su(s) trabajo(s): 26 de septiembre.
- Fecha límite de programación de trabajos: 3 de octubre.
- Fecha límite de pago para asistente: Se recomienda realizar su pago al menos 5 días hábiles antes del evento, aunque puede inscribirse durante el desarrollo de éste.
- Congreso: 14-17 de octubre.
- Fecha límite para publicación de memorias: Enero de 2026.

## Registro, Inscripciones y Pago

RECUERDE, para registrar su participación como asistente debe contar con el comprobante del pago de su inscripción, de lo contrario su registro será automáticamente improcedente.

Registro como asistente CISQM2025 + 6° CIEQ:

<https://forms.gle/gXMsCac9RjQXZfjm7>

Registro como Ponente CISQM2025 + 6° CIEQ:

<https://forms.gle/mtzZf9QtGPwHVLkv9>

Portal de pagos:

<https://sqm.org.mx/procesar-pago-cisqm2025-6cieq/>

## Solicitud de informes

Solicite información sobre el congreso a [congresos@sqm.org.mx](mailto:congresos@sqm.org.mx) con el Asunto (depende de su participación) Congreso Internacional de la Sociedad Química de México 2025 y/o 6° Congreso Internacional de Educación Química

**CONGRESO INTERNACIONAL DE LA SOCIEDAD QUÍMICA DE MÉXICO 2025**

**6° CONGRESO INTERNACIONAL DE EDUCACIÓN QUÍMICA**

*Química Inteligente para un Entorno Sostenible*

**14 15 16 17**  
**OCTUBRE 2025**  
Expo QUÍMICA  
*Del gran laboratorio del futuro a la innovación  
Aplicaciones of Advanced Oxidation Processes*

**17 OCTUBRE 2025**  
13:00 hrs.

**SIMPOSIO**  
Reacciones de Multicomponentes  
en Química Medicinal

**Dr. Carlos Jesús Cortés García**  
Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

*"Síntesis y estudios in vitro e in silico de moléculas fibriladas farmacofóricas mediante reacciones de multicomponentes cíclicas y de alto orden a partir de reactivos bifuncionales"*

**Dra. Rocío Cárdenas-Montaño**  
Profesora Titular "C"  
Universidad de Colima

*"Síntesis Verde multicomponente de moléculas heterocíclicas de potencial aplicación"*

**Dr. Alejandro Islas Méndez**  
Profesor Titular "C", Departamento de Química  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

*"La reacción de multicomponentes de Ugi-Diels para la síntesis de nuevas patilinteracciones con actividad aguda, citotóxica y antiviral"*

ACS  
ACS Publications  
NÚOVO  
Química es vida



SOCIEDAD QUÍMICA DE MÉXICO, A.C.  
"La química nos une"

# CONGRESO INTERNACIONAL DE LA SOCIEDAD QUÍMICA DE MÉXICO 2025

Y

## 6° CONGRESO INTERNACIONAL DE EDUCACIÓN QUÍMICA

14 | 15 | 16 | 17

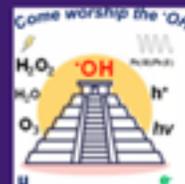
OCTUBRE 2025

ExpoQUÍMICA

*"Química Inteligente para un Entorno Sostenible"*



Sede Monterrey, Nuevo León  
Hotel NH Collection Monterrey San Pedro



*2nd Latin-American School on Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes*

**OCTOBER 12<sup>ND</sup> – 13<sup>TH</sup> 2025**

Symposium on AOPs in the ICMCS, "Recent advances on Sustainable Advanced Oxidation Processes (AOPs) for the environment"

**OCTOBER 15<sup>TH</sup> 2025**

Professional and student poster presentations

**OCTOBER 15<sup>TH</sup> AND 16<sup>TH</sup>, 2025**



<https://sqm.org.mx/ii-lasaops/>



"La química nos une"



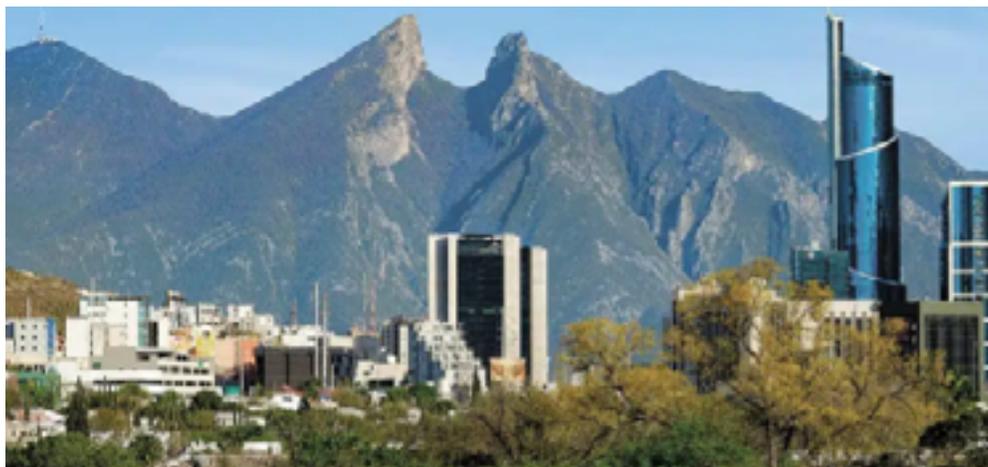


**2<sup>nd</sup> Latin-American School on  
Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes**  
Venue: [NH Collection Monterrey San Pedro, México](#)  
October 12<sup>nd</sup> – 13<sup>th</sup> 2025 – 2<sup>nd</sup> Latin America School on AOPs  
October 14<sup>th</sup> – 17<sup>th</sup> 2025 – [International Congress of the Mexican Chemical Society \(ICMCS\)](#)  
October 15<sup>th</sup> 2025 – Symposium on AOPs in the ICMCS, “Recent advances on Sustainable Advanced  
Oxidation Processes (AOPs) for the environment”  
October 15<sup>th</sup> and 16<sup>th</sup>, 2025 – Professional and student poster presentations”

#### I<sup>st</sup> announcement

In June 2014 to promote the higher education of young researchers in the environmental applications of Advanced Oxidation Processes (AOPs), a group of scientists from different European Universities and Research Institutes founded the “European PhD School on AOPs”. Subsequently, with the intention to make the association international, institutions from non-EU countries joined the school. More countries have joined this initiative, and nowadays the “International PhD School on Advanced Oxidation Processes” (IPS-AOP) includes 75 Scientific Committee members from 25 different Countries.

The “[International PhD School on Advanced Oxidation Processes](#)” (IPS-AOP) will organize from October 12<sup>nd</sup> - 13<sup>th</sup> 2025 the 2<sup>nd</sup> Latin American School on “Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes”; and in collaboration with [Sociedad Química de México](#) (SQM), a specialized symposium on AOPs and poster presentations, during the [International Congress of Mexican Chemical Society \(ICMCS\)](#) at San Pedro Monterrey, Mexico.



Landscape of “Cerro de la Silla” at Monterrey

The summer school is organized for IPS-AOP PhD candidates and other PhD students, MSc students, undergraduate students, post-doctoral researchers, and professionals. This School program includes (i) *Invited didactic lectures* to overview the most important aspects related to AOPs presented by experts of international relevance, (ii) *parallel discussion groups* on the topics of the day session, chaired by the respective speakers; PhD students can join the discussion group better fits their interest to discuss in more detail the topic the speaker introduced in the day session; (iii) *PhD short oral presentations* and (iv) *poster presentations of all the attendees of the school, to be held during the Poster session during the 2025 International Congress of the Mexican Chemical Society*, (v) *symposium of recent advances in AOPs* which will take place during the 2025 International Congress of the Mexican Chemical Society where expert in the AOPs will present their most recent studies in this field.

Invited didactic lectures at the school are typically 40 minutes (and 10 minutes for questions).

## Students Presentations

### a) Short oral presentations from PhD students

PhD students are strongly encouraged to prepare a short oral presentation, communicating the advances of their PhD thesis work on the environmental application of AOP. These presentations are 5-minute talks that will be presented on the second day of the school (October 13<sup>th</sup>) and should be prepared as a PowerPoint presentation with **no more than five slides**. The presentations must be sent to the organizers **MANDATORILY MAXIMUM ON OCTOBER 12<sup>TH</sup> 16:00 HRS (CDMX TIME)**. **PRESENTATIONS WILL NOT BE ACCEPTED IF THIS POINT IS NOT COVERED.**

### b) Poster Presentation for all the students and professional school attendees

The advances in the environmental application of AOP for *all school attendees* will be displayed at the **Poster Presentations sessions during the 2025 International Congress of the Mexican Chemical Society**. Students' poster session will be on Thursday, 16<sup>th</sup> October, and professional Poster presentations will take place on Wednesday, 15<sup>th</sup> October. Poster requirements: (A0 size or 120mm (L) × 90 mm (W)). The best poster award will be selected from the participants of the students' session.

## Program of the 2<sup>nd</sup> Latin America School on AOPs

1<sup>st</sup> day, 12<sup>th</sup> October 2025

08.00- 09:00 Registration

08.15-08.30 Welcome greetings & Introduction (Organizing committee)

### Session 1: Complementary skills

Time	Title	Speaker
08.30-09.20 (50 min)	Strategies for successful application of high-performance liquid chromatography to determine emerging contaminants in water	Julia Liliana Rodríguez Santillan, Instituto Politécnico Nacional, México
09.20-10.10 (50 min)	Reaction Mechanisms in Photoelectrocatalysis for Advanced Oxidation Processes	Patricio Javier Espinoza Montero, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador
10.10-11.00 (50 min)	Quantification methods of hydroxyl radical	Bernardo A. Frontana Uribe, Universidad Nacional Autónoma de México, México
11.00-11.20	Coffee break	
11.20-12.10 (50 min)	Fundamentals of electrocatalysis for high oxidation potential species	Carlos Alberto Martínez Huitlé, Federal University of Rio Grande do Norte, Brasil
12.10-13.00 (50 min)	Overcoming limitations in photo-electrocatalysis to underpin industrial applications	Jorge Gabriel Vázquez-Arenas, Instituto Politécnico Nacional, Mexico
13.00-15.00	Lunch break	

## Session 2: Fundamentals of AOPs

Time	Title	Speaker
15.00-15.50 (50 min)	To confirm	Sixto Malato Rodríguez, Plataforma Solar de Almería, Spain
15.50-16.40 (50 min)	Advanced electrochemical oxidation processes coupled with sunlight on a pilot scale	Juan Manuel Peralta Hernández, Universidad de Guanajuato, México
16.40-17.30 (50 min)	Why five decades of massive research on heterogeneous photocatalysis has not driven to water treatment applications?	Cesar Pulgarin (virtual), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland
17.30-17.50	Coffee break	
17.50-18.30	Parallel discussion groups on the topics of the session	Chaired by the keynote speakers

2<sup>nd</sup> day, 13<sup>th</sup> October 2025

## Session 3: Fundamentals of AOPs

Time	Title	Speaker
08.30-09.20 (50 min)	Characterization methods in the design of materials with photocatalytic applications	Aracely Hernández Ramírez, Universidad Autónoma de Nuevo León, México
09.20-10.10 (50 min)	Evaluación de procesos foto-asistidos: errores y aciertos	Reyna Natividad Rangel, Universidad Autónoma del Estado de México, México

## Session 4: Environmental applications of AOPs

Time	Title	Speaker
10.10-11.00 (50 min)	"Valorization of industrial wastes in the Advanced Oxidation Processes in gas phase"	Erika Bustos Bustos, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Mexico
11.00-11.20	Coffee break	
11.20-12.10 (50 min)	Advanced Oxidation Processes based on Ultrasonic Waves	Ricardo A. Torres Palma, Universidad de Antioquia, Colombia
12.10-13.00 (50 min)	Sustainable innovation in water treatment: Sulfate radicals and their high activity in advanced oxidation	Jorge Rodríguez Chueca, Universidad Politécnica de Madrid, Spain
13.00-13.30 (50 min)	(Photo)electro-Fenton and Related Processes: Fundamentals, Emerging Trends, and Future Perspectives	Hugo Olvera Vargas, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico
13.30-15.00	Lunch break	

## Session 4: Environmental applications of AOPs (continuation)

Time	Title	Speaker
15:00-15:45	Parallel discussion groups on the topics of the session	Chaired by the organizers, All participants
15:45-17:45	Short presentations (5 min each, 24 SP) only PhD students	
17:30-17:50	Coffee Break	
17:50-18:30	Best short presentation award	Chaired by the organizers, All participants
18:30-18:45	Summer School conclusions	

In collaboration with the  
Congress of the Mexican Chemical Society

Symposium on AOPs, “Recent advances on Sustainable Advanced Oxidation Processes (AOPs) for the environment”

Call for oral presentations will be announced soon by the Mexican Chemical Society

October 15th and 16th, 2025 – Professional and student poster presentations”

Call for poster contributions will be announced soon by the Mexican Chemical Society

MCS webpage (<https://sqm.org.mx/>)  
(Symposium & Posters presentation)

Category	2 <sup>nd</sup> Latin-American School on AOPs 12 <sup>th</sup> – 13 <sup>th</sup> October 2025	2 <sup>nd</sup> Latin-American School on AOPs + Mexican Chemical Society International Congresses 12 <sup>th</sup> – 17 <sup>th</sup> October 2025	2 <sup>nd</sup> Latin-American School on AOPs + Mexican Chemical Society Congresses 12 <sup>th</sup> – 17 <sup>th</sup> October 2025
Rates	Preferential	Mexican Chemical Society's NON-MEMBERS	Mexican Chemical Society's MEMBERS
Academics / Professionals	\$ 2,000.00	\$ 8,000.00 Principio del formulario	\$ 5,600.00
Graduate Students	\$ 1,750.00	\$ 6,250.00	\$ 4,450.00
Undergraduate Students	\$ 1,250.00	\$ 4,050.00	\$ 3,050.00 Final del formulario

### Key dates

June 9<sup>th</sup> 2025 – Registration Opens for School

August 15<sup>th</sup> 2025 – Deadline for Application for School

August 30<sup>th</sup> 2025 – Notification of Acceptance for School

12<sup>nd</sup> – 13<sup>th</sup> October 2025 – 2<sup>nd</sup> Latin America School on AOPs

15<sup>th</sup> October 2025 – Symposium on AOPs in the International Congress of MCS

15<sup>th</sup> October 2025 – Professional poster presentation during the International Congress of MCS

16<sup>th</sup> October 2025 – Students' poster presentation during the International Congress of MCS

Registration ONLY to the 2nd Latin America School on AOPs:  
<https://forms.gle/eZSkD4Q6iFNCV5gJ6>

Please, check additional information concerning for registration for the International Congress of MCS webpage (<https://sqm.org.mx/convocatoria-cisqm2025-6cieq/>) (Symposium & Posters presentation)

The cost of the School is to fund only the coffee-brakes & spaces in the venue location: [NH Collection Monterrey San Pedro, México](#)

Become a MEMBER of the Mexican Chemical Society:  
<https://sqm.org.mx/convocatoria-de-membresia-2025/>

### Payment by Interbank Electronic Transfer

Available accounts

BANCO: INBURSA, CLABE: 036180500371496588

BANCO: IXE-BANORTE, CLABE: 072180002783443102

Payment concept: SchoolPOAsSurnameFirstNameLetter  
(Example: SchoolPOAsFrontanaB)

Payments under PayPal and Stripe, refer to: <https://sqm.org.mx/ii-lasaops/>

International attendee payments, please contact the School Chairmans

International Transfer to BANORTE account

Bank details

Bank name: Banco Mercantil del Norte (BANORTE)

Address: Insurgentes Sur 2do nivel 1605, Col. San José

Insurgentes, C.P. 03900, México, D.F.

SWIFT code: MENOMXMTXXX

Name of recipient bank account:

SOCIEDAD QUIMICA DE MEXICO,A.C.

(Name must be exactly as stated on bank account)

Bank name and Account number: BANORTE account

0278344310 CLABE number: 072180002783443102

Chase Bank: JP Morgan Chase Bank New York, NY

Routing number for Chase Bank (ABA): 021000021

SWIFT code for Chase Bank: CHASUS33XXX

### Recipient information:

Name of recipient: SOCIEDAD QUIMICA DE MEXICO,A.C.

Address: BARRANCA DEL MUERTO No. 26, COL. CREDITO CONSTRUCTOR, DELEG. BENITO JUAREZ, C.P. 03940 CIUDAD DE MEXICO, MEXICO.

Phone numbers: +5255 56626837 / +5255 56626823

e-mail: [soquimex@sqm.org.mx](mailto:soquimex@sqm.org.mx)

### Organizing Committee

Prof. Dr. Jorge G. Vázquez Arenas (CMP+L, Instituto Politécnico Nacional, México), Chairman:

Email: [jgvazquez@ipn.mx](mailto:jgvazquez@ipn.mx)

Prof. Dr. Bernardo A. Frontana Uribe (Centro Conjunto en Investigación en Química Sustentable, Instituto de Química UNAM, México), Chairman: [bafrontu@unam.mx](mailto:bafrontu@unam.mx)

Prof. Dr. Luigi Rizzo (University of Salerno - Italy), IPS-AOP General Coordinator

Prof. Dr. Sixto Malato (Plataforma Solar de Almeria), IPS-AOP Regional Coordinator for Europe

Prof. Dr. Ricardo Torres Palma (Universidad de Antioquia, Colombia), IPS-AOP Regional coordinator for Latin-America

Prof. Dr. Fernando Cortés Guzman (Facultad de Química UNAM), elected president of the Mexican Chemical Society

**CONGRESO INTERNACIONAL DE LA SOCIEDAD QUÍMICA DE MÉXICO 2025**

**6º CONGRESO INTERNACIONAL DE EDUCACIÓN QUÍMICA**

**14 15 16 17**  
**OCTUBRE 2025**

*Química Inteligente para un Entorno Sostenible*

**RESERVACIÓN HOTEL**

**NH COLLECTION MONTERREY SAN PEDRO**

Av. Jose Vasconcelos 402,  
66268, Monterrey, México

Dudas/preguntas  
Mauricio Verges  
+52 5656026837  
[soquimex@sqm.org.mx](mailto:soquimex@sqm.org.mx)

<https://shorturl.at/eJp40>

# Bioactivación enzimática de hidrocarburos aromáticos policíclicos: una vía clave hacia la carcinogénesis mediada por Citocromo P450

Alexa Dahé Ortíz Del Collado, Francisco Hernández-Luis\*

## RESUMEN

En esta comunicación se presenta una revisión sobre la participación de algunas de las enzimas de la familia del Citocromo P450 (CYP450) en la biotransformación de los hidrocarburos aromáticos policíclicos cuyas consecuencias impactan el comportamiento de estos compuestos como agentes pro-genotóxicos y carcinogénicos

## INTRODUCCIÓN

La exposición ambiental a compuestos potencialmente carcinogénicos representa un riesgo constante para la salud humana. Entre ellos, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) destacan por su ubicuidad y por requerir una activación metabólica para ejercer su efecto tóxico. Esta transformación, conocida como bioactivación, convierte a estos compuestos inactivos en metabolitos altamente reactivos capaces de interactuar con el ácido desoxirribonucleico (ADN). Esto desencadena procesos genotóxicos que, si no son reparados de forma eficaz, pueden dar paso a mutaciones estables en el genoma celular, promoviendo el inicio y la progresión del proceso carcinogénico.

La comprensión de este fenómeno requiere abordar los temas de la bioactivación y genotoxicidad provocada por compuestos químicos. Estos comportamientos no sólo facilitan la explicación del potencial mutagénico de diversas sustancias, sino que permiten también identificar los elementos que determinan su peligrosidad.

La genotoxicidad se refiere a la habilidad de agentes químicos, físicos y biológicos, para dañar la información genética de las células, no sólo al ADN *per se*, sino a todos aquellos componentes celulares que se encuentran relacionados con la funcionalidad y comportamiento de los cromosomas, como las estructuras del huso mitótico, así como a proteínas que intervienen en procesos de reparación o condensación del ADN. (Dural et al, 2020) El material genético está expuesto a daño constante no sólo por factores intrínsecos del metabolismo intracelular, sino a la exposición a sustancias genotóxicas y pro-genotóxicas. Estas últimas provocan daño tras el proceso de su activación metabólica. Las reacciones de bioactivación son en su mayoría mediadas por la familia de enzimas agrupadas bajo la denominación de citocromo P450 (CYP450). Están conformadas por un grupo de hemoproteínas que juegan un papel crucial en la biotransformación de xenobióticos en el organismo participando principalmente en reacciones de

oxidación. Diversos informes indican que en humanos cerca del 80% del metabolismo oxidante, y aproximadamente el 50% de la eliminación de compuestos externos al organismo (xenobióticos), está relacionada a una o más enzimas del CYP450. (Wu et al, 2024). Esta participación lo posiciona como un sistema enzimático clave para el estudio de la biotransformación de xenobióticos; entre ellos, los compuestos carcinogénicos. Uno de los grupos de xenobióticos pro-genotóxicos son los HAPs. Su importancia radica en su alta prevalencia en el ambiente (producto de la combustión incompleta de materia orgánica) y las diversas rutas de exposición humana a estas sustancias. La acumulación del daño genético provocado por la exposición repetida a estos compuestos y sus productos metabólicos, junto con fallas en los sistemas de reparación del ADN, pueden favorecer eventos claves como la activación de protooncogenes, la inactivación de genes supresores de tumores y la evasión de mecanismos de control celular; lo que constituye una vía directa hacia la carcinogénesis. (Pérez-Morales López et al., 2016) Por lo que, mediante la revisión sistemática de artículos científicos, este trabajo pretende analizar el papel del CYP450 en la bioactivación de HAPs como parte importante de esta área del conocimiento en la Toxicología química.

Se plantea como hipótesis que la expresión y actividad diferencial de las enzimas de la familia CYP450, junto con la frecuencia y tipo de exposición a compuestos genotóxicos, determinan la magnitud del riesgo de efectos tóxicos y el desarrollo de enfermedades relacionadas.

El objetivo de esta revisión es presentar los conocimientos publicados en artículos de revistas indizadas que muestran los avances en la comprensión del papel de los HAPs como agentes carcinogénicos y la problemática actual que manifiesta su biotransformación por el CYP450.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Estrategia de búsqueda para la identificación y selección de estudios

#### 2.1.1 Criterios de selección

Se consideraron artículos publicados hasta el año 2024, sin restringir un periodo específico de búsqueda, aunque la literatura utilizada abarca publicaciones desde el 2004. Se dio preferencia a estudios escritos en inglés por su predominancia en la divulgación científica actual, sin excluir trabajos en español que resultaron pertinentes para los objetivos del presente trabajo. En el caso de artículos de revistas científicas, se procuró que el factor de impacto fuera igual o superior a 1.0. Para cada artículo identificado, se revisó el título, el resumen (abstract) y, cuando fue posible, el texto completo.

\*Facultad de Química, UNAM  
[franher@unam.mx](mailto:franher@unam.mx)

Criterios de inclusión:

Estudios que evalúan el papel de las enzimas de la superfamilia CYP450 en la bioactivación de hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Estudios que vinculan dicha bioactivación con procesos iniciadores de daño a biomoléculas o células asociado a la carcinogénesis.

Estudios que evalúan el efecto genotóxico y pro-genotóxico de la biotransformación de compuestos aromáticos policíclicos mediante las enzimas CYP.

Criterios de exclusión:

Estudios que evalúan el efecto de la superfamilia de enzimas CYP en la biotransformación de xenobióticos no genotóxicos.

Artículos sin respaldo de revisión por pares.

Artículos publicados en revistas indizadas con factor de impacto menor a 1.0.

Una vez que los artículos de relevancia fueron seleccionados, se extrajo la información que fue sometida a un *cross-check* o verificación cruzada.

### 2.1.2 Bases de datos consultadas

Los artículos fueron buscados y seleccionados mediante el uso de las bases de datos PubMed y ScienceDirect (Elsevier); así como el uso de Google Scholar para obtener publicaciones con información actualizada y de relevancia en el estudio.

### 2.1.3 Palabras claves

La metodología de búsqueda en las bases de datos previamente mencionadas, así como en Google Scholar, se hizo mediante el uso de las siguientes palabras claves:

Bioactivation, biotransformation, carcinogenesis, CYP o CYP450 o Cytochrome P450, genotoxicity o genetic toxicity, pro-genotoxicity, polycyclic aromatic hydrocarbons o PAHs; así como una combinación de ellas para encontrar artículos de relevancia para el presente estudio.

## 3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los hallazgos más relevantes sobre la bioactivación de HAPs por el CYP450.

### 3.1 Identificación de compuestos pro-genotóxicos y su relevancia en la salud pública

Los HAPs representan a uno de los grupos de compuestos más estudiados por su potencial pro-genotóxico. Son compuestos aromáticos con dos o más anillos de benceno fusionados en diversas configuraciones estructurales, y que no presentan sustituyentes. (Lawal, 2027) Los HAPs se forman principalmente en procesos de combustión incompleta o pirólisis de materia orgánica; por lo que la exposición a éstos es posible por actividades industriales, emisiones vehiculares, cocción de alimentos, o consumo de tabaco. Además, se consideran como contaminantes ambientales ubicuos, por lo que es muy difícil evitar la exposición a éstos. Las vías de ingreso al organismo más importantes son la inhalación, el contacto dérmico y la ingestión. (Mallah *et al.*, 2022; Patel *et al.*, 2020; Sen y Field, 2013)

Son considerados como carcinógenos debido a que los metabolitos derivados de su biotransformación provocan daños genotóxicos con la consecuente acción mutagénica y carcinogénica. (Vázquez-Gómez *et al.*, 2016) Los HAPs comprenden la clase más grande de agentes mutagénicos y carcinógenos confirmados. Por esta razón, figuran en la lista de contaminantes importantes de la Unión Europea (UE) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). Entre éstos, 16 son considerados prioritarios puesto que se dispone de más información disponible y, sobre todo, hay posibilidad de que las personas estén expuestas a ellos (Figura 1). (Ifegwu y Anyakora, 2015)

Entre los tipos de cáncer a los que se han asociado distintos HAPs se encuentran cáncer gástrico, pulmón, colorrectal, vejiga, piel y leucemia. (Ifegwu y Anyakora, 2015)

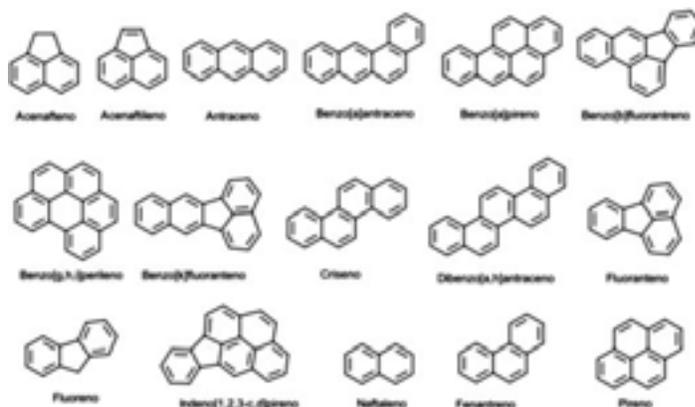


Figura 1. Estructura química de los 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos prioritarios

### 3.2 Bioactivación metabólica mediada por CYP450

A diferencia de los carcinógenos directos, que reaccionan y dañan el ADN, los HAPs necesitan ser primero activados por enzimas de la familia del CYP450. Otras enzimas, pertenecientes a la Fase II del metabolismo, pueden tener una menor participación en la bioactivación, como son la glucuronosiltransferasa (UGT), la *N*-acetiltransferasa (NAT), la sulfotransferasas (ST) y la metiltransferasas (MT). Su participación importante es catalizar reacciones de desactivación del potencial genotóxico de los HAPs.

#### 3.2.1 El CYP450

CYP450 es el término colectivo que designa una familia de hemoproteínas que catalizan la biotransformación de sustratos liposolubles de estructuras diversas, tanto endógenos como xenobióticos. Estas enzimas se ubican en el retículo endoplasmico y participan en la denominada Fase I (funcionalización) de la biotransformación de xenobióticos. Modifican a los sustratos principalmente por reacciones de oxidación; y con menor frecuencia, reacciones de reducción y peroxidación. Trabajan conjuntamente con las enzimas de Fase II (que transfieren porciones estructurales a los sustratos) y las proteínas transportadoras de la Fase III (trasladan al metabolito polar hacia la parte extracelular) en la eliminación de xenobióticos. (Baader y Meyer, 2007; Leclerc *et al.*, 2010; Guengerich y Munro, 2013)

Hasta el 2023, se habían descubierto más de 12000 genes *CYP* en los seres vivos, que abarcan desde bacterias, arqueas y virus hasta plantas superiores y animales. Basándose en la similitud de las secuencias y en las relaciones filogenéticas, se considera que los *CYP* que comparten >40% y 55% de identidad de su secuencia de aminoácidos pertenecen a la misma familia y subfamilia, respectivamente. (Liu et al., 2023)

### 3.2.2 Conversión a metabolitos reactivos

Si bien la mayoría de las reacciones del *CYP450* provocan la generación de grupos polares para incrementar la solubilidad acuosa de los xenobióticos y por ende facilitar su excreción del cuerpo, también involucran la activación metabólica de pro-genotóxicos. Por ejemplo, si la oxidación de xenobióticos por *CYP450*, deriva en la formación de intermediarios electrófilos reactivos capaces de reaccionar con el ADN, provoca la formación de aductos potencialmente mutagénicos. (Reed et al., 2018)

Aunque los HAPs presentan una estructura policíclica planar que les permite intercalarse en el ADN, este comportamiento no genera daño directo a la macromolécula. Sin embargo, cuando son biotransformados por *CYP450* sufren una conversión a diol-epóxidos altamente reactivos que se unen covalentemente al ADN, causando alteración genotóxica (ej. en genes como TP53). (Vázquez-Gómez et al., 2016)

A nivel general, se ha identificado que las subfamilias de las *CYP450* de mayor importancia en la biotransformación de HAPs a sus metabolitos reactivos son las *CYP1A1* y *CYP1B1*. (Shimada y Fujii-Kuriyama, 2004)

### 3.2.3 Mecanismo de activación de HAPs carcinogénicos

De manera general, los HAPs son compuestos lipofílicos, por lo tanto, atraviesan las membranas celulares con facilidad y arriban al citoplasma donde en el retículo endoplásmico se encuentran con la familia *CYP450*. Durante su transformación, pueden seguir tres rutas principales:

- la vía de *CYP1A1/1B1* y la vía *CYP450*/ epóxido hidrolasa (*CYP450/EH*),
- la vía *CYP450* peroxidasa,
- la vía de las aldoceto reductasas (*AKR*).

La porción estructural de los HAPs conocida como zona bahía, compuesta por tres anillos de fenilo distribuidos de forma no lineal (Figura 2), marca su susceptibilidad principalmente a la biotransformación por la vía *CYP450/EH*. (Moorthy et al., 2015)

Los HAPs suelen ser biotransformados a fenoles, catecoles y quinonas, lo que resulta en la formación de diolepóxidos u *o*-quinonas que pueden reaccionar con el ADN para producir aductos. (Shimada y Fujii-Kuriyama, 2004; Moorthy et al., 2015) Por ejemplo, las quinonas reaccionan con el N-7 de la guanina y el N-3 de la adenina en el ADN. Esta formación de aductos del ADN puede causar desajustes en la replicación del mismo, así como alteraciones en la metilación y/o la unión del promotor, lo que conduce a una mutación, y en última instancia, a la tumorigénesis. Asimismo, los metabolitos pueden promover un aumento de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés: Reactive Oxidant Species), que pueden dañar el ADN, lípidos o proteínas, y también participar en el inicio de la carcinogénesis. (Moorthy et al., 2015)



Figura 2. Activación del Benzo[a]pireno por medio de *CYP450* y su impacto genotóxico.

### 3.3 Evidencia de genotoxicidad inducida por metabolitos activados

Entre los estudios realizados para la evaluación del efecto genotóxico de la biotransformación de HAPs por el *CYP450* destacan el uso de ratones “knockout” en el que uno o varios genes han sido escindidos; como en los modelos *Cyp1a1(-/-)*, *Cyp1a1(+/-)*, *Cyp1b1(-/-)*. Administrando Benzo[a]pireno (BaP), en los ratones *Cyp1a1/1b1(-/-)* se encontró una menor cantidad de aductos ADN-BaP, en comparación con los ratones de tipo silvestre. Sin embargo, en el modelo *Cyp1a1(-/-)* la formación de aductos fue 4 veces mayor que en los ratones de tipo silvestre. Lo anterior sugiere que *CYP1A1* es en realidad menos importante para la bioactivación genotóxica de los HAPs o participa de manera más preponderante en su bioactivación para su eliminación.

Otro de los aspectos a tomar en cuenta es que los HAPs son ligandos del receptor de hidrocarburos de arilo (AhR, por sus siglas en inglés: Aryl hydrocarbon Receptor), el cual al activarse provoca la producción de enzimas metabolizadoras, incluidas *CYP1A1* y *CYP1B1* (Holme J.A. et al, 2022). Por ello, en un experimento se administró BaP a ratones “knockout” *Ahr(-/-)* y *Ahr(+/-)* y *Ahr(+/+)*, este último como control de comparación. En estos estudios, a pesar de la ausencia del AhR en los ratones *Ahr(-/-)* y *Ahr(+/-)*, se encontraron aductos de ADN-BaP. Los autores del trabajo atribuyeron este hallazgo a otras enzimas del *CYP450* (p.ej. *CYP2C*) o a enzimas no *CYP450* (p. ej. *PTGS-2*), reguladas por mecanismos independientes al AhR, y que adicionalmente contribuyen a la bioactivación genotóxica del BaP. (Reed et al., 2018)

Un estudio reciente llevado a cabo por Šimečková et al., demostró que ciertos HAPs, especialmente los ligandos al AhR, presentan un perfil genotóxico característico vinculado con su bioactivación por enzimas del sistema *CYP450*. Los investigadores utilizaron células hepáticas humanas diferenciadas tipo HepaRG para evaluar, mediante ensayos de expresión génica por qRT-PCR, los efectos de varios HAPs sobre genes claves relacionados con el metabolismo

y daño celular. (Šimečková *et al.*, 2022) Entre los compuestos evaluados incluyeron benzo[a]antraceno (BaA), criseno (Chry), benzo[a]pireno (BaP) y benzo[k]fluoranteno (BkF). Se observó una fuerte inducción de CYP1A1, un biomarcador clásico de la activación del AhR, lo que confirmó su participación en la biotransformación de estos compuestos. Esta bioactivación se asoció con la inducción de genes tempranos de respuesta al estrés y marcadores de genotoxicidad, como ATF3, GDF15 y CDKN1A (p21). Lo anterior sugiere que el metabolismo mediado por AhR-CYP1A1 podría ser un evento central en la toxicidad celular inducida por estos HAPs. (Šimečková *et al.*, 2022)

El estudio también comparó estos efectos con los de HAPs de bajo peso molecular (Fluoreno y Pireno), los cuales mostraron una actividad significativamente menor y no indujeron marcadores de estrés celular o genotoxicidad en las células HepaRG.

Por otro lado, un estudio reciente informó sobre la captura de HAPs (88.21 µg) por microplásticos de desechos electrónicos. El lixiviado proveniente de estos microplásticos fue aproximadamente 1000 veces más tóxico que el BaP. Estos HAPs pueden ingresar al organismo humano a través del consumo de agua potable, sales y diversos mariscos que han estado en contacto con microplásticos por lo que presentan un alto potencial de causar cáncer. La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) informó que los estudios epidemiológicos mostraron un aumento de los casos de cáncer de pulmón debido a la inhalación de HAPs. Los HAPs como benz[a]antraceno, BaP, benzo[b]fluoranteno, criseno y dibenz[a,h]antraceno se consideran sustancias potencialmente cancerígenas para los humanos. (Kumar *et al.*, 2022)

#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La relación entre la bioactivación enzimática de los HAPs y el desarrollo de cáncer constituye un paradigma fascinante en toxicología química. Gracias a los estudios realizados acerca de HAPs específicos, se demostró que su genotoxicidad no reside en su estructura química *per se*, sino que es dependiente de su transformación metabólica; de manera que sus metabolitos electrofílicos puedan formar enlaces covalentes con el ADN. Aquí, la especificidad enzimática juega un papel determinante: mientras CYP1B1 funge consistentemente como bioactivador, CYP1A1 muestra una función dual. Esta aparente contradicción se aclara al considerar que el equilibrio entre los efectos de activación y desintoxicación depende del contexto fisiológico, la especificidad enzimática y la capacidad de inducción de las enzimas en los tejidos dianas, como pulmón, hígado y piel.

Los estudios en modelos de ratones “knockout” indicaron que, si CYP1A1 se encuentra ausente, la carga de aductos de HAPs con el ADN se cuadruplica, lo que sugiere que su papel protector supera al de bioactivador de HAPs en condiciones normales. Por otro lado, el hallazgo más revelador es que incluso en ausencia del sistema regulador de estas enzimas, como el AhR, se presenta actividad genotóxica. Esto complica el panorama de riesgo al revelar la participación de vías metabólicas alternativas independientes del AhR, posiblemente a través de otras enzimas de la familia del CYP450 o sistemas enzimáticos alternos, cuyo papel sea predominantemente de bioactivación de HAPs.

Además, la activación simultánea de la enzima CYP1A1 y de ciertos

indicadores de daño en el ADN, como p21 y ATF3, confirman de forma clara cómo la exposición a compuestos cuya transformación metabólica afectan al ADN, inician procesos que conducen al cáncer y otras respuestas celulares al daño genotóxico.

Asimismo, el contexto ambiental implica nuevos paradigmas toxicológicos que agravan el panorama debido a la crisis global de contaminación por microplásticos. Al fungir eficazmente como vectores de HAPs, han creado una exposición silenciosa pero constante que ha redefinido las vías tradicionales de contacto, transportando silenciosamente carcinógenos hasta nuestros alimentos, agua e incluso el aire que respiramos. Todo ello representa un riesgo significativo para la salud pública debido a su persistencia ambiental y diversas rutas para su exposición. Resulta imperativo la imposición de nuevos marcos regulatorios que contemplen el riesgo acumulativo de los HAPs transportados por microplásticos, con el fin de desarrollar estrategias más efectivas de prevención frente a esta amenaza invisible que podría alterar nuestro buen estado de salud.

#### 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta revisión demuestran que la actividad genotóxica de los HAPs se encuentra intrínsecamente relacionada con su biotransformación mediante la superfamilia de enzimas CYP450, mayoritariamente por las CYP1A y CYP1B, mediante diversos mecanismos de acción genotóxica. La exposición constante a HAPs, agentes mutagénicos y carcinógenos confirmados, hace necesario que estudios, *in vitro* e *in vivo*, correlacionen su actividad con las CYP450, sean desarrollados para entender de mejor forma sus mecanismos de genotoxicidad y, en consecuencia, establecer protocolos de prevención y control de riesgo.

##### 5.1 Limitaciones del trabajo realizado

Esta revisión explora la relación del CYP450 con la bioactivación de HAPs; sin embargo, esta no ha sido elucidada del todo. La razón es que se encontraron resultados inconsistentes en la bibliografía consultada, que provocan complicaciones para establecer generalizaciones sobre la participación del CYP450 como transformador de los HAPs de agentes pro-genotóxicos a compuestos carcinógenos.

##### 5.2 Nuevas líneas de investigación

Como prevención de los posibles efectos adversos de los HAPs, destaca como área de interés el desarrollo de mejores técnicas analíticas para su detección y cuantificación en matrices ambientales complejas, ya que un mejor monitoreo de áreas contaminadas permitiría evaluar y prever la exposición humana a estos pro-genotóxicos.

En este sentido, se plantea la necesidad del desarrollo de modelos *in vitro* más representativos que simulen condiciones fisiológicas, respuesta e interacciones moleculares del cuerpo humano ante la exposición de HAPs; integrando a su vez parámetros farmacocinéticos más realistas (particularmente exposiciones crónicas a bajas dosis) y la variabilidad interindividual derivada de polimorfismos genéticos, con el fin de aproximarse a escenarios más reales y complejos para entender de mejor forma sus mecanismos de genotoxicidad.

## Agradecimientos

Al Programa de Servicio Social “Elaboración de materiales de divulgación digitalizados para poner al alcance de la comunidad universitaria la información relacionada con las problemáticas de salud que incluyen la carcinogénesis química, la quimioterapia o la quimiopreención” (clave SS-2025-12/157-3976) por ser el espacio institucional que dio lugar a la presente revisión. A la Biblioteca digital UNAM por proporcionar los artículos revisados en formato de texto completo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. Baader, M.; Meyer, U. A. Cytochrome P450 (CYP) Monooxygenase Superfamily. In *xPharm: The Comprehensive Pharmacology Reference*; Elsevier, 2007; pp 1–4. <https://doi.org/10.1016/B978-008055232-3.60511-2>. (accessed Apr 22, 2025)
2. Dural, E.; Shah, U.-K.; Pritchard, D.; Chapman, K. E.; Doak, S. H.; Jenkins, G. J. S. The Effect of Chronic Dosing and P53 Status on the Genotoxicity of Pro-Oxidant Chemicals *in Vitro*. *Mutagenesis* 2020, 35 (6), 479–489. <https://doi.org/10.1093/mutage/geaa024>. (accessed Apr 22, 2025)
3. Guengerich, F. P.; Munro, A. W. Unusual Cytochrome P450 Enzymes and Reactions. *J. Biol. Chem.* 2013, 288 (24), 17065–17073. <https://doi.org/10.1074/jbc.R113.462275>. (accessed Apr 22, 2025)
4. Ifegwu, O. C.; Anyakora, C. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. In *Advances in Clinical Chemistry*; Elsevier, 2015; Vol. 72, pp 277–304. <https://doi.org/10.1016/bs.acc.2015.08.001>. (accessed Apr 22, 2025)
5. Jörn A. Holme J.A.; Jan Vondráček; Miroslav Machala; Dominique Lagadic-Gossmann; Christoph F.A. Vogel; Eric Le Ferrec; Lydie Sparfel; Johan Øvrevik. Lung cancer associated with combustion particles and fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) - The roles of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and the aryl hydrocarbon receptor (AhR). *Biochem. Pharmacol.* 2023, 216, 11580. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2023.115801> (accessed May 21, 2025)
6. Kumar, R.; Manna, C.; Padha, S.; Verma, A.; Sharma, P.; Dhar, A.; Ghosh, A.; Bhattacharya, P. Micro(Nano)Plastics Pollution and Human Health: How Plastics Can Induce Carcinogenesis to Humans? *Chemosphere* 2022, 298, 134267. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134267>.
7. Lawal, A. T. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. A Review. *Cogent Environ. Sci.* 2017, 3 (1), 1339841. <https://doi.org/10.1080/23311843.2017.1339841>. (accessed Apr 22, 2025)
8. Leclerc, J.; Tournel, G.; Courcot-Ngoubo Ngangue, E.; Pottier, N.; Lafitte, J.-J.; Jaillard, S.; Mensier, E.; Lhermitte, M.; Broly, F.; Lo-Guidice, J.-M. Profiling Gene Expression of Whole Cytochrome P450 Superfamily in Human Bronchial and Peripheral Lung Tissues: Differential Expression in Non-Small Cell Lung Cancers. *Biochimie* 2010, 92 (3), 292–306. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2009.12.007>. (accessed Apr 22, 2025)
9. Liu, C.; Li, J.; Qi, X.; Wang, L.; Sun, D.; Zhang, J.; Zhang, K.; Li, J.; Li, Y.; Wen, H. Cytochrome P450 Superfamily in Spotted Sea Bass: Genome-Wide Identification and Expression Profiles under Trichlorfon and Environmental Stresses. *Comp. Biochem. Physiol. Part D Genomics Proteomics* 2023, 46, 101078. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2023.101078>.
10. Mallah, M. A.; Changxing, L.; Mallah, M. A.; Noreen, S.; Liu, Y.; Saeed, M.; Xi, H.; Ahmed, B.; Feng, F.; Mirjat, A. A.; Wang, W.; Jabar, A.; Naveed, M.; Li, J.-H.; Zhang, Q. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon and Its Effects on Human Health: An Overview. *Chemosphere* 2022, 296, 133948. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133948>. (accessed Apr 22, 2025)
11. Moorthy, B.; Chu, C.; Carlin, D. J. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: From Metabolism to Lung Cancer. *Toxicol. Sci.* 2015, 145 (1), 5–15. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv040>. (accessed Apr 23, 2025)
12. Patel, A. B.; Shaikh, S.; Jain, K. R.; Desai, C.; Madamwar, D. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches. *Front. Microbiol.* 2020, 11, 562813. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.562813>. (accessed Apr 22, 2025)
13. Pérez-Morales López, G.; Morales Gómez, P.; Haza Duaso, A. I. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) (I): Toxicidad, Exposición de La Población y Alimentos Implicados. *Rev. Complut. Cienc. Vet.* 2016, 10 (1), 1–15. [https://doi.org/10.5209/rev\\_RCCV.2016.v10.n1.51869](https://doi.org/10.5209/rev_RCCV.2016.v10.n1.51869). (accessed Apr 22, 2025)
14. Reed, L.; Arlt, V. M.; Phillips, D. H. The Role of Cytochrome P450 Enzymes in Carcinogen Activation and Detoxication: An *in Vivo*–*in Vitro* Paradox. *Carcinogenesis* 2018, 39 (7), 851–859. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgy058>. (accessed Apr 23, 2025)
15. Sen, S.; Field, J. M. Genotoxicity of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Metabolites. In *Advances in Molecular Toxicology*; Elsevier, 2013; Vol. 7, pp 83–127. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62645-5.00003-1>. (accessed Apr 22, 2025)
16. Shimada, T.; Fujii-Kuriyama, Y. Metabolic Activation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons to Carcinogens by Cytochromes P450 IA1 and IB1. *Cancer Sci.* 2004, 95 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1111/j.1349-7006.2004.tb03162.x>. (accessed Apr 23, 2025)
17. Šimečková, P.; Pěňčíková, K.; Kováč, O.; Slavík, J.; Pařenicová, M.; Vondráček, J.; Machala, M. *In Vitro* Profiling of Toxic Effects of Environmental Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Nuclear Receptor Signaling, Disruption of Endogenous Metabolism and Induction of Cellular Stress. *Sci. Total Environ.* 2022, 815, 151967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151967>. (accessed Apr 23, 2025)
18. Vázquez-Gómez, G.; Rubio-Lightbourn, J.; Espinosa-Aguirre, J. J. Mecanismos de acción del receptor de hidrocarburos de arilos en el metabolismo del benzo[a]pireno y el desarrollo de tumores. *TIP* 2016, 19 (1), 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2016.02.006>. (accessed Apr 22, 2025)
19. Wu, L.; Luo, H.; Xu, J.; Yu, L.; Xiong, J.; Liu, Y.; Huang, X.; Zou, X. Vital Role of CYP450 in the Biodegradation of Antidiabetic Drugs in the Aerobic Activated Sludge System and the Mechanisms. *J. Hazard. Mater.* 2024, 469, 134056. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134056>. (accessed Apr 22, 2025)

# La polémica en torno a la nomenclatura de Lavoisier en México

Elda Gabriela Pérez Aguirre\*

Como muchos otros saberes, la química es una disciplina que, para ser apreciada, enseñada y aprendida en su totalidad, debe presentarse como una actividad humana en todas sus dimensiones: cognitiva, social, histórica, cultural, política y económica. La ciencia no es un campo estático ni poseedor de verdades absolutas, sino un proceso en continua reestructuración.

En México, la introducción, asimilación y difusión de los postulados de Lavoisier fue un proceso acelerado, catalizado por diversos factores, algunos de índole local. Otros, como la preexistencia de una larga tradición en metalurgia y minería que se remonta al México prehispánico, que continuó en el México colonial y que por supuesto permanece en el México independiente, con la participación de algunas instituciones que estudiaron los recursos naturales y económicos del territorio. Un tercer factor fue la llegada de expediciones científicas y las Reformas borbónicas, sucesos que catapultaron la investigación científica. Los trabajos de Lavoisier fueron objeto de discusión y crítica casi de manera simultánea a su publicación en Europa y por lo menos ocho años antes de que se impartieran de forma oficial los primeros cursos de química moderna en el Real Seminario de Minería<sup>1</sup>.

En México, la adopción de la química moderna está ligada al conocimiento de las plantas medicinales y a la explotación de minerales preciosos. Es decir, los estudios de Lavoisier fueron apreciados por la botánica, la farmacia, la medicina, la metalurgia y la minería. Lo anterior gracias a la existencia de científicos preocupados por estar al tanto de los últimos avances de la ciencia en Europa, a fin de aplicarlos en su lugar de trabajo en la resolución de problemas prácticos.

José Antonio Álzate, quien presentó por primera vez en las Gacetas de Literatura (periódico del cual era editor) la nueva nomenclatura química propuesta por Lavoisier, pertenecía a ese selecto grupo de científicos. Su intención, sin embargo, no era alabarla, sino repudiarla.<sup>2</sup> El rechazo de Alzate a la nomenclatura de Lavoisier y al sistema de Linneo -contra el que también polemizaba- no surgieron únicamente de su concepción utilitarista de la ciencia. Alzate dejaba salir en sus querellas un arraigado sentimiento de dolor por la indiferencia expresada ante los científicos recién llegados a América hacia la tradición científica local. Como es natural, al principio hubo una confrontación entre las nuevas teorías que llegaban y las que prevalecían en la Nueva España. Aunado a esto, las diferencias de tradiciones, contextos e instituciones, desataron un choque entre las diferentes maneras de hacer ciencia.

Consideremos que en esos años la difusión de la ciencia estuvo ligada al poder colonial, por lo que era inevitable que obedeciera a los intereses de la Corona. La enseñanza de la nueva ciencia era pues, otra forma de sometimiento, mediante el saber científico y académico. En la segunda mitad del siglo XVIII, el territorio de la Nueva España tuvo auge tanto en la esfera económica como en las ciencias y las artes. La Corona española lanzó en este periodo una serie de reformas que contemplaban la distribución de tierras a los indígenas y el fomento de la minería argentífera. El principio fundamental era el de fortalecer al Estado subordinando la economía a sus intereses, aún cuando el bienestar de las colonias fuese dañado. Así, los estadistas españoles aumentaron la recolección de impuestos y facilitaron el libre comercio de los puertos de la Nueva España con la península. En el campo de la minería, la producción de la plata se mantuvo activa todo un siglo, principalmente debido al descubrimiento de nuevas vetas y no tanto a la introducción de adelantos científicos.<sup>3</sup>

El Estado debía mantener la educación de las colonias como medio para garantizar la continuidad de los trabajos necesarios para el logro de sus proyectos, y así fue como se vio en la necesidad de impulsar la educación del pueblo, y de crear instituciones culturales y científicas, como la Academia de San Carlos en 1784, el Jardín Botánico en 1788 y el Colegio de Minería en 1792.

El hombre mediante el conocimiento podía acceder al control, dominio y explotación de la tierra. El optimismo de esta visión antropocéntrica, utilitaria y económica parecía prometer un futuro sin privaciones a la humanidad. Se reconoció que la observación y la experimentación son los medios que permiten llegar al conocimiento preciso de la naturaleza. Los centros educativos entraron en auge. Por ejemplo, en Puebla, el seminario de San Francisco Javier, y en las ciudades de Querétaro, Morelia y Guadalajara, los institutos jesuitas correspondientes. En la Ciudad de México, el Seminario de San Ildefonso, el Colegio de San Pedro y San Pablo, el Colegio Real de Leyes (fundado en 1760) y la Escuela Especial de Cirugía establecida en 1786. Cabe mencionar que en la Real y Pontificia Universidad, que había sido fundada desde 1551, mantenía una carga teológica opuesta a las nuevas tendencias.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Trabulse E. en: Historia de la Ciencia en México, Tomo I, México, CONACYT, Fondo de Cultura Económica, 1983.

<sup>2</sup>Aceves, P. "La introducción y difusión del sistema de Lavoisier en México (1788-1800)". Actas de la Sociedad Mexicana de Historia de la Ciencia y de la Tecnología, 1987

<sup>3</sup>Brading, D.A., Mineros y Comerciantes en el México Borbónico (1768-1810). México, Fondo de Cultura Económica, 1975, p. 47.

<sup>4</sup>Navarro, B. La introducción de la filosofía moderna en México. México, El Colegio de México, 1948. p. 70.

Por lo que respecta a los libros y publicaciones de Europa, éstos circulaban en la Nueva España con relativa facilidad pese a la censura de la inquisición. Se leyeron las fuentes originales y se adoptaron las ideas de Newton, Gassendi, Leibnitz, Tosca, Losada o Feijoo. En este ambiente de renovación y cambio de la estructura económica comenzó a desarrollarse el sentimiento nacionalista en México. José Antonio Álzate hace elogio de los principales logros científicos en algunos de sus escritos, tanto de la época precolombina como del México colonial; asimismo describe la abundancia y la belleza de los recursos naturales de América y defiende la tradición científica mexicana frente a lo que él percibía como menosprecio de algunos científicos europeos que trataban de introducir las nuevas teorías científicas.

En México el desarrollo de la química durante la época colonial estuvo estrechamente relacionado a los aspectos prácticos de dicha ciencia; es decir, a la minería, la metalurgia y diversas industrias como la de materiales como jabón, vidrio, pólvora y los alimentos. Estas actividades permitieron que se conocieran en la Nueva España las diferentes teorías químicas en boga en Europa.

Durante los siglos XVI y XVII, las ideas de los alquimistas prevalecieron en este campo. En los inicios del siglo XVIII se difundió la iatroquímica y en el último tercio de la centuria, se expandieron los principios de la teoría del flogisto. A pesar de que no existía cátedra de química en la Universidad, ésta era practicada en la medicina, farmacia, botánica y en la metalurgia. En las últimas décadas del siglo XVIII, en la Nueva España se conocían los últimos adelantos de la ciencia europea en botánica, química, física, matemáticas, metalurgia, farmacia y medicina, ciencias que encontraron un terreno fértil preparado por una larga tradición científica. Todo ello favoreció para que la nueva nomenclatura química de Lavoisier fuera tempranamente discutida y criticada por José Antonio Alzate en las Gacetas de Literatura, ocho años antes de que se instituyera la cátedra de química en el Real Seminario de Minería.<sup>5,6</sup>

### Aparición de la Química moderna

Mientras que la coronación de la “ciencia moderna” tuvo lugar en el siglo XVII con la publicación de los *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Principia de Isaac Newton, la revolución en la química ocurre un siglo después con la teoría del oxígeno de Lavoisier. Hasta entonces la química experimental se sustentó en la teoría de los cuatro elementos aristotélicos: tierra, agua, aire y fuego, que se creía que tenían un carácter primigenio y elemental. De todos ellos, para el químico, los elementos más importantes eran el aire y el fuego.<sup>7</sup>

La constatación crucial de la revolución química fue que el “aire” no es un elemento simple sino una mezcla de varios componentes químicos distintos en el mismo estado físico: vapor o gas. En cuanto al “fuego”, éste no fue lo suficientemente entendido por los creadores de la química moderna. Lavoisier se refirió erróneamente al mismo como una sustancia simple y la rebautizó como “calórico”, explicando que en el transcurso de las reacciones químicas existe una pérdida o una ganancia de calor.

No fue hasta el siglo XIX, con el auge de la termodinámica, cuando los primeros químicos lograron encuadrar el fuego dentro de un marco teórico satisfactorio. Lavoisier introdujo en el estudio de la química lo que más se necesitaba en aquella época: los hábitos y

la actitud mental del físico entrenado. Desde el comienzo de sus investigaciones, en 1764, se dio cuenta de la importancia que tiene la precisión de las medidas.

### El sistema de Lavoisier

Las nuevas teorías que surgieron de los trabajos de Lavoisier sobre la oxidación de los metales y la composición del aire, provocaron una revolución en la química. La transformación de la teoría implicó además de la elaboración de nuevos postulados teóricos, una metodología acorde a ellos, una nomenclatura para expresarlos y una práctica experimental diferente.

Lavoisier leyó en la Academia Real de Ciencias una memoria sobre “la necesidad de reformar y perfeccionar la nomenclatura química”. En ella incluyó los resultados de una serie de reuniones en las que él mismo había participado conjuntamente con sus colegas franceses Morveau, Bertholet y Fourcroy. En dicho documento, los científicos franceses consideraban que la metodología a emplearse en el estudio de las ciencias físicas debía asegurar que las ideas fueran una consecuencia inmediata de una experiencia o de una observación a partir de lo conocido a lo desconocido, ya que, decían: la imaginación “tiende a conducirnos continuamente más allá de la verdad y a establecer conclusiones que no se derivan de los hechos”.

La reestructuración propuesta a la nomenclatura química de Lavoisier y sus colaboradores permitiría superar las expresiones antiguas tales como: el polvo de Algaroth, la sal de Alembroth, de Pampolix, el agua de Turbith, mineral de Etiopía, el aceite de vitriolo, las mantequillas de antimonio y arsénico, las flores de zinc, etc. La nueva nomenclatura, a diferencia de las anteriores, trataba de designar la propiedad fundamental de las sustancias y de seguir una lógica que hacía posible ordenar el universo de la química. Los nuevos nombres fueron tomados del griego y sus etimologías expresaban la propiedad más característica de los cuerpos que designaban.

La lógica de la propuesta para reformar el lenguaje de la química, que hoy en día parece adecuada y familiar, cuando se dio a conocer provocó el rechazo de muchos de los químicos. No se trataba solamente de cambiar una nomenclatura por otra, sino que su adopción llevaba implícita la aceptación de las nuevas teorías que habían surgido de los trabajos de Lavoisier (sobre la composición del aire y oxidación de los metales) y precisaba el abandono de las teorías antiguas arraigadas por siglos de tradición.

### El rechazo de Alzate a las nomenclaturas de Linneo y de Lavoisier

En la Nueva España, Alzate vio la nueva nomenclatura con recelo, simplemente como otra forma de expresar “el mismo objeto”, sin caer en la cuenta de que la nomenclatura de Lavoisier expresaba otro muy diferente, dado que los conceptos que forman el nuevo cuerpo teórico se hallan cambiado desde sus cimientos.

<sup>5</sup> El primer curso de química fue impartido por Fausto de Elhuyar, director del Real Seminario de Minería en 1796.

<sup>6</sup> Izquierdo, J.J. La primera casa de las ciencias en México, México, Ed. Ciencia, 1958.

<sup>7</sup> Kuhn, T.S. La estructura de las revoluciones científicas, México, Fondo de Cultura Económica, 1983.

En el prólogo del célebre Tratado elemental de química, Lavoisier señala la imposibilidad de aislar la nomenclatura de la ciencia y la ciencia de la nomenclatura ya que "la palabra hace nacer la idea, la idea debe representar el hecho... y como son las palabras las que conservan las ideas y las que las transmiten resulta que no se puede perfeccionar el lenguaje sin perfeccionar la ciencia, ni la ciencia sin el lenguaje".

Una nueva teoría implica no sólo postulados, metodología y experimentación diferentes, sino también un lenguaje apropiado para expresar sus nuevas abstracciones y simbolismos. Por esto, mientras que la nueva nomenclatura resultaba clara, fácil y precisa para aquellos que compartían la nueva teoría, carecía de significado para los partidarios de la teoría del flogisto, como era el caso de José Antonio Alzate.

La Corona española tenía el poder para decidir la creación y las características de las instituciones científicas, la asignación de las personas para encargarse de ellas y aún la selección de los métodos y textos para el estudio de las diversas ciencias. Se impone entonces, la construcción de un nuevo marco teórico que abarcara no sólo la realidad en la que eran elaboradas las teorías científicas, sino también, la interacción con el entorno que las recibía.

El rechazo de Alzate a las nomenclaturas de Linneo y Lavoisier no se derivó únicamente de sus concepciones epistemológicas con respecto al método ni a los nexos filosóficos y metodológicos entre ambas nomenclaturas. Su oposición férrea estuvo gobernada por su visión del mundo, sus convicciones políticas y, más aún, por el sentimiento nacionalista que salía a la defensa tanto de la tradición científica como de los valores locales, ignorados por los europeos. Su oposición a las nuevas corrientes servía de foro para abogar por la revaloración de la actividad científica de su país y buscaba poner en primer plano la divulgación de la ciencia como un medio de alcanzar el bien público.



# Carbonatos cíclicos: aprovechamiento del CO<sub>2</sub> en la obtención de solventes verdes

Jesús Alonso Cruz Valdez<sup>1,\*</sup>, Valvanuz Cahuantzi<sup>2</sup>, Rosalba Patiño-Herrera<sup>2</sup>, José Elías Pérez López<sup>3</sup>

## Resumen

La demanda progresiva de productos derivados de hidrocarburos ha provocado un aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub>, las cuales son causantes directas del calentamiento global. Sin embargo, una alternativa para el aprovechamiento del CO<sub>2</sub>, es su uso como reactivo para la síntesis de carbonatos cíclicos como productos valiosos. Debido a su baja toxicidad, alta biodegradabilidad, bajo costo de producción y versatilidad de aplicaciones, los carbonatos cíclicos han sido catalogados como solventes verdes, entre los que se destacan el carbonato de propileno, carbonato de etileno y carbonato de glicerol. El presente trabajo es una breve revisión bibliográfica sobre la síntesis de los carbonatos cíclicos más destacados, sus propiedades fisicoquímicas, principales usos y panorama actual en el mercado.

**Palabras clave:** carbonatos cíclicos, aprovechamiento del CO<sub>2</sub>, biodegradabilidad.

## Introducción

En décadas recientes, el crecimiento acelerado de la población ha provocado un aumento en el consumo de hidrocarburos provenientes del petróleo crudo (p. ej. n-octano, propano y benceno), los cuales son materia prima para la obtención de energía, textiles, medicamentos y demás productos de uso cotidiano. Aproximadamente, el 80 % del suministro energético mundial es generado a partir de la combustión de diésel o gas natural (Lopes et al., 2020), los cuales son una mezcla de hidrocarburos. Mientras que la oferta del polipropileno, el segundo polímero más utilizado para la elaboración de plásticos (sólo detrás del polietileno), muestra un consumo estimado de 135 millones de toneladas de propileno en 2025 (Cruz-Valdez et al., 2022), el cual es producido por el craqueo térmico del propano. Ambos casos tienen características en común ya que requieren de un elevado consumo energético para su transformación y purificación, provocando un aumento en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico.

A finales de la década de 1990, diversos estudios enfatizaron que el incremento de emisiones de CO<sub>2</sub> está directamente relacionado con el calentamiento global (Büttner et al., 2017). En el año 2015, los niveles diarios promedio de CO<sub>2</sub> superaron las 400 ppm (Büttner et al., 2017). Esta problemática socioambiental tiene consecuencias negativas, tales como: derretimiento de casquetes polares, aumento del nivel del mar, alteración de los ciclos pluviales, sequías, escasez de agua dulce, y contaminación del aire (Lopes et al., 2020). Por otra parte, dado que el CO<sub>2</sub> es un material altamente disponible, económico, no tóxico, ni inflamable (Büttner et al., 2017), su captura, almacenamiento y uso como materia

prima ha ganado importancia como alternativa para la mitigación de gases de efecto invernadero y la obtención de productos de alto valor agregado, como son los carbonatos cíclicos (Santiago et al., 2021).

## Síntesis y propiedades de los carbonatos cíclicos

Las rutas más comunes para la producción a escala industrial de los carbonatos cíclicos más utilizados (carbonato de propileno, carbonato de etileno y carbonato de glicerol), es mediante la cicloadición de CO<sub>2</sub> con epóxidos y dioles (Pescarmona, 2021; Rollin et al., 2021). La Figura 1 muestra la síntesis para la producción de carbonato de propileno y carbonato de etileno; en las cuales, se utilizan como epóxidos reactantes al óxido de propileno y al óxido de etileno (Pescarmona, 2021), respectivamente. En las reacciones anteriormente mencionadas existe una eficiencia de conversión del 100%. Asimismo, la Figura 1 describe la síntesis para la producción de carbonato de glicerol, en la cual se utiliza como diol reactante al glicerol (Rollin et al., 2021). Sin embargo, esta ruta no es eficiente para la producción de carbonato de glicerol; por lo tanto, una alternativa es la reacción conjunta de óxido de propileno, CO<sub>2</sub> y glicerol (Alassmy et al., 2021).



**Figura 1.** Síntesis de carbonatos cíclicos vía cicloadición de CO<sub>2</sub> epóxidos y dioles como reactivos. **Fuente:** elaboración propia.

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. <sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Química, Tecnológico Nacional de México en Celaya. <sup>3</sup>Instituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

\*[jesus.cruz@iqcelaya.itc.mx](mailto:jesus.cruz@iqcelaya.itc.mx)

La Tabla I muestra las principales características y propiedades fisicoquímicas del carbonato de propileno, carbonato de etileno y carbonato de glicerol; entre ellas, destacan su baja toxicidad y ecotoxicidad, baja viscosidad y volatilidad, bajo costo de producción y alta biodegradabilidad (Ayuso *et al.*, 2023). Asimismo, al ser solventes de fácil separación y reciclaje, poseer temperaturas de ebullición elevadas, y tener características polares apróticas (en los carbonatos de etileno y propileno) (Ayuso *et al.*, 2023), estas sustancias son utilizadas como solventes en procesos de extracción; donde la alta miscibilidad del carbonato de etileno y del carbonato de propileno con el benceno y el etanol, resulta favorable para el diseño de procesos de destilación extractiva y extracción líquido-líquido.

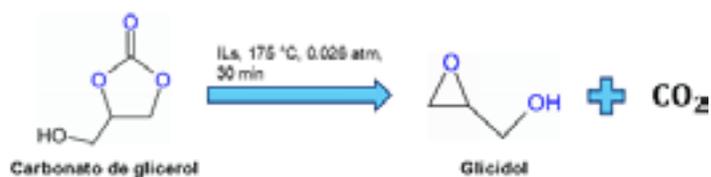
**Tabla I.** Propiedades fisicoquímicas de los carbonatos cíclicos más utilizados en procesos industriales (Sonnati *et al.*, 2013; Pescarmona, 2021).

Propiedades fisicoquímicas	Solventes verdes		
	Carbonato de propileno	Carbonato de etileno	Carbonato de glicerol
Fórmula química	$C_4H_6O_3$	$C_3H_4O_3$	$C_4H_6O_4$
Peso molecular, [g/mol]	102.090	88.063	118.088
Temperatura de fusión, [°C]	-49	36	-69
Temperatura de ebullición, [°C]	242	248	160 (a 0.8 mmHg)
Temperatura de inflamación, [°C]	135	143	190
Densidad, [g/cm <sup>3</sup> ]	1.2047 (20 °C)	1.3214 (39 °C)	1.4
Viscosidad, [mPa · s]	2.53 (25 °C)	1.93 (40 °C)	85.4 (25 °C)
Entalpía de formación, [kJ/mol]	-613.2 (25 °C)	-581.6 (25 °C)	n.a.
Capacidad calorífica, [J/mol · °C]	218.6 (25 °C)	133.9 (50 °C)	n.a.
Solubilidad a 20 °C	Miscible en agua, etanol, acetona y benceno	Miscible en agua, etanol, ácido acético y benceno	Miscible en agua
Riesgo a la salud	Causa irritación en ojos	Nocivo si se ingiere	Sin información reportada

## Principales usos de los carbonatos cíclicos

### Reacciones de descarboxilación

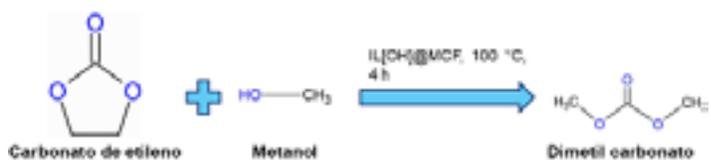
La reacción de descarboxilación del carbonato de glicerol es un método típico para la obtención de 1,2-anhidroglicerol (glicidol), como producto deseado, y CO<sub>2</sub> como impureza. En la Figura 2 se muestra la ruta cinética propuesta por Choi *et al.* (2013) en la cual, a 175 °C, 0.026 atm de presión, 30 minutos de reacción y utilizando líquidos iónicos (LIs) como catalizadores, se obtiene una conversión máxima del 98 %. El glicidol tiene una amplia variedad de aplicaciones industriales, tales como: recubrimiento de superficies, agente de gelación en sólidos propulsores, estabilizador para aceites naturales y polímeros vinílicos, y como separador de emulsiones (demulsificante) (Rollin *et al.*, 2021). Asimismo, es utilizado como intermediario en la síntesis de ésteres y aminas, siendo de alto valor agregado para la producción de resinas epóxicas y poliuretanos (Rollin *et al.*, 2021).



**Figura 2.** Síntesis de glicidol vía descarboxilación de carbonato de glicerol. **Fuente:** elaboración propia.

### Reacciones de transesterificación

La reacción de transesterificación de carbonato de etileno con metanol, para la producción de dimetil carbonato (DMC), ha emergido como una alternativa a la reacción establecida de fosfógeno con metanol, dado que el fosfógeno es un compuesto altamente tóxico y corrosivo (Tomishige *et al.*, 2004). La Figura 3 muestra la síntesis propuesta por Lee *et al.* (2016) para la producción de DMC vía transesterificación de carbonato de etileno con exceso de metanol, en la cual, a 100 °C, 4 h de reacción, y utilizando [IL]OH soportado en espuma celular mesoporosa (MCF), como catalizador heterogéneo, existe una conversión de DMC del 77 %, con bajas impurezas de metanol como subproducto. Debido a su alto contenido de oxígeno, baja toxicidad, alta estabilidad química, y rápida biodegradabilidad, el DMC es utilizado como aditivo en la gasolina e intermediario químico en la industria polimérica (Rollin *et al.*, 2021).



**Figura 3.** Síntesis de dimetil carbonato (DMC) vía transesterificación de carbonato de metileno con metanol. **Fuente:** elaboración propia.

## Producción de poliuretanos

Los poliuretanos son un grupo de materiales valiosos que tienen una gran variedad de aplicaciones en los sectores industrial y doméstico. La demanda de poliuretanos fue de 24 Mton (megatoneladas) en 2020, representando el 6 % de todos los plásticos producidos cada año (Rollin et al., 2021). Algunos tipos de poliuretanos, como las espumas rígidas y flexibles, elastómeros, adhesivos y recubrimientos, son ampliamente manufacturados y utilizados como suelas de calzado, componentes para recubrimientos eléctricos, e implantes médicos utilizados en cirugía (Suyarwanshi et al., 2018). La ruta tradicional para la síntesis de poliuretanos es mediante la reacción de isocianatos con alcoholes. Sin embargo, los isocianatos son compuestos cancerígenos y mutagénicos, dado que son producto de la reacción de fosfogéno con sales de amina (Rollin et al., 2021). Una ruta alterna y ecológica para la producción de poliuretanos sin isocianatos (Non-isocyanate polyurethanes, NIPU por sus siglas en inglés) es mediante la reacción de adición de diaminas con carbonatos cíclicos de cinco o seis miembros (Pescarmona, 2021). En la Figura 4 se muestra dicha reacción, que da como resultado dos isómeros, cada uno conteniendo un grupo uretano e hidroxilo (Kathalewar et al., 2013). Donde un isómero tiene un grupo  $\beta$ -hidroxilo secundario, y el otro un grupo hidroximetil (Kathalewar et al., 2013). Estos grupos hidroxilo tienen la capacidad de formar puentes de hidrógeno intermoleculares con el grupo uretano, proporcionando una resistencia química dos veces superior, en comparación con poliuretanos convencionales (Kathalewar et al., 2013).



**Figura 4.** Síntesis de poliuretanos sin isocianatos (NIPU) vía adición de diaminas con carbonatos cíclicos. **Fuente:** elaboración propia.

## Dispositivos electrónicos

Por cuestiones de seguridad, para un mejor desarrollo de las baterías de iones de litio utilizadas en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos, es importante preparar materiales menos inflamables. Debido a las altas puridades de los carbonatos de etileno y propileno, su buena conductividad de iones de litio a temperatura ambiente, y elevada constante dieléctrica, necesaria para la disolución de sales de litio, estos solventes son adecuados para la generación de electrolitos conductores (Pescarmona, 2021).

## Procesos de desaromatización de hidrocarburos

Los ILs y los solventes eutécticos profundos (DESs), a pesar de ser catalogados como solventes verdes, requieren de múltiples pasos de síntesis que generan una gran cantidad de residuos, tienen altas viscosidades y densidades, su alta higroscopicidad puede provocar corrosión, sus costos de producción son elevados, y su regeneración a altas temperaturas puede incrementar su

descomposición y volatilidad (Cruz Valdez et al., 2025). Debido a estas estas razones, actualmente los ILs y los DESs no son una alternativa real de aplicación industrial. Dado que, el carbonato de propileno tiene un bajo costo de producción, y polaridad aprótica, ha emergido como un solvente alternativo en procesos de destilación extractiva para la separación de mezclas n-hexano/benceno. En este caso, el carbonato de propileno al tener una elevada solubilidad y selectividad con el benceno, permite extraerlo del n-hexano, obteniendo elevadas puridades de n-hexano, y una completa recuperación del benceno (Cruz Valdez et al., 2025).

## Mercado internacional de los carbonatos cíclicos

De acuerdo con la amplia variedad de aplicaciones industriales de los carbonatos cíclicos, su demanda incrementará durante los próximos años. En el 2024, la demanda de carbonato de glicerol fue de \$2.23 billones de dólares, de los cuales se espera un incremento de \$3.85 billones de dólares para el 2034, teniendo una expectativa de Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (TCAC) del 5.63% durante el periodo 2024-2034. El carbonato de propileno tuvo un valor de mercado de \$0.45 billones de dólares en el 2023, mostrando un crecimiento proyectado de \$0.62 billones de dólares para el 2030, exhibiendo una TCAC del 5.05% en el periodo 2023-2030. Mientras que, en el 2024 la demanda del carbonato de etileno fue de \$0.84 billones de dólares, alcanzando una proyección de \$1.5 billones de dólares para el 2029, teniendo un crecimiento del TCAC del 14.4% durante el periodo 2024-2029. Sin embargo, a pesar del alto valor agregado de estos carbonatos cíclicos, se estima que la producción global anual es de 100 kton/año (kilotoneladas/año), siendo significativamente menor a las 37,000 kton/año de emisiones de CO<sub>2</sub> (Pescarmona, 2021).

## Conclusiones

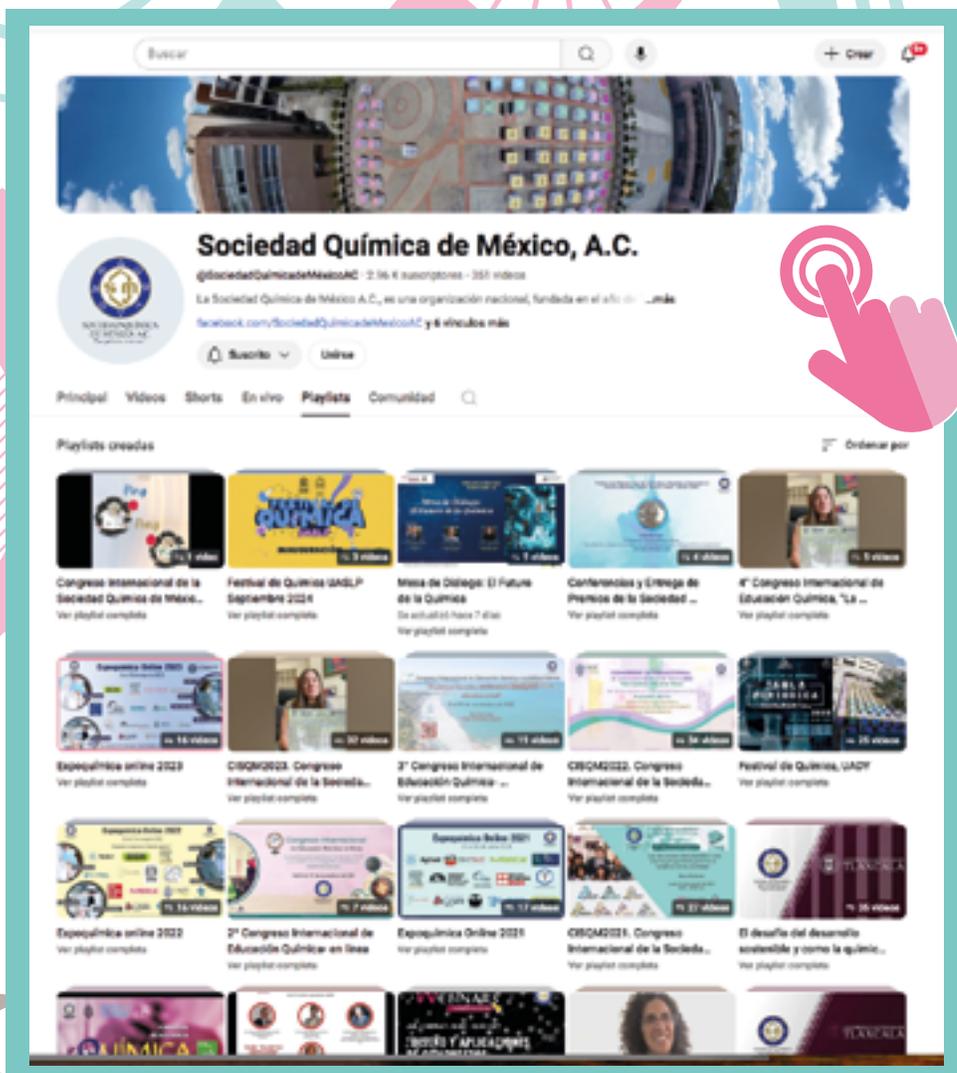
Los carbonatos cíclicos, obtenidos a partir de emisiones de CO<sub>2</sub>, han emergido como nuevos solventes verdes debido a su bajo costo de producción, baja toxicidad y ecotoxicidad. Asimismo, debido a la disposición y elevada eficiencia atómica del CO<sub>2</sub>, la producción de carbonatos cíclicos favorece a la mitigación de gases de efecto invernadero, mientras se obtienen productos de alto valor agregado. En este caso, los carbonatos cíclicos tienen una amplia versatilidad de aplicaciones, desde ser utilizados en procesos de extracción de hidrocarburos, hasta ser usados como reactantes en procesos de descarboxilación y transesterificación. Por lo tanto, son un importante tema de investigación para su desarrollo y aplicación en diversas áreas; dado que, su demanda seguirá incrementando durante los próximos años.

## Bibliografía

1. Lopes, E.J.C., Ribeiro, A.P.C., Martins, L.M.R.S. New trends in the conversion of CO<sub>2</sub> to cyclic carbonates. *Catalysts*. **2020**, 10(5), 479. <https://doi.org/10.3390/catal10050479>
2. Cruz-Valdez, J.A., Patiño-Herrera, R., González-Alatorre, G., Louvier-Hernández, J.F., Avilés Martínez, A., Pérez, E. Decrease in CO<sub>2</sub> emissions in obtaining polymer-grade propylene by extractive distillation. *Chem. Eng. Technol.* **2022**, 45(9), 1571-1580. <https://doi.org/10.1002/ceat.202200110>

3. Büttner, H., Longwitz, L., Steinbauer, J. Recent developments in the synthesis of cyclic carbonates from epoxides and CO<sub>2</sub>. *Top Curr. Chem. (Z)*. 2015, 375, 50. <https://doi.org/10.1007/s41061-017-0136-5>
4. Santiago, R., Moya, C., Hernández, E., Cojocar, A.-V., Navarro, P., Palomar, J. Extending the ability of cyclic carbonates for extracting BTEX to challenging low aromatic content naphtha: the designer solvent role at process scale. *Computers & Chemical Engineering*. 2021, 154, 107468. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107468>
5. Pescarmona, P.P. Cyclic carbonates synthesised from CO<sub>2</sub>: applications, challenges and recent research trends. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2021, 29, 100457. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100457>
6. Rollin, P., Soares, L.K., Barcellos, A.M., Araujo, D.R., Lenardão, E.J., Jacob, R.G., Perin, G. Five-membered cyclic carbonates: versatility for applications in organic synthesis, pharmaceutical, and materials sciences. *Appl. Sci.* 2021, 11, 5024. <https://doi.org/10.3390/app11115024>
7. Alassmy, Y.A., Paalman, P.J., Pescarmona, P.P. One-pot fixation of CO<sub>2</sub> into glycerol carbonate using ion-exchanged amberlite resin beads as efficient metal-free heterogeneous catalysts. *ChemCatChem*. 2021, 13(1), 475-486. <https://doi.org/10.1002/cctc.202001632>
8. Ayuso, M., Mateo, S., Belinchón, A., Navarro, P., Palomar, J., García, J., y Rodríguez, F. Cyclic carbonates as solvents in the dearomatization of refinery streams: experimental liquid-liquid equilibria, modelling, and simulation. *J. Mol. Liq.* 2023, 380, 121710. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121710>
9. Sonnati, M.O., Amigoni, S., Taffin de Givenchy, E.P., Darmanin, T., Choulet, O., Guittard, F. Glycerol carbonate as a versatile building block for tomorrow: synthesis, reactivity, properties and applications. *Green Chem.* 2013, 15, 283-306. <https://doi.org/10.1039/C2GC36525A>
10. Choi, J.S., Simanjuntaka, F.S.H., Oh, J.H., Lee, K.I., Lee, S.D., Cheong, M., Kim, H.S., Lee, H. Ionic-liquid-catalyzed decarboxylation of glycerol carbonate to glycidol. *J. Catal.* 2013, 297, 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.10.015>
11. Tomishige, K., Yasuda, H., Nurunnabi, M., Li, B., Kunimoru, K. Selective formation of ethylene carbonate from ethylene glycol and carbon dioxide over CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> solid solution catalysts. *Studies in Surface Science and Catalysis*. 2004, 153, 165-168. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(04\)80239-8](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(04)80239-8)
12. Lee, K.-H., Lee, S., Shin, D., Hahm, H.-S. Dimethyl carbonate synthesis via transesterification of ethylene carbonate and methanol using ionic liquid catalysts immobilized on mesoporous cellular foams. *Res. Chem. Intermed.* 2016, 42, 109-121. <https://doi.org/10.1007/s11164-015-2396-4>
13. Suryawanshi, Y., Sanap, P., Wani, V. Advances in the synthesis of non-isocyanate polyurethanes. *Polym. Bull.* 2018, 76, 3233-3246. <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2531-7>
14. Kathalewar, M.S., Joshi, P.B., Sabnis, A.S., Malshe, V.C. Non-isocyanate polyurethanes: from chemistry to applications. *RSC Adv.* 2013, 3, 4110-4129. <https://doi.org/10.1039/C2RA21938G>
15. Cruz Valdez, J.A., Patiño-Herrera, R., Avilés Martínez, A., Barajas-Villarruel, L.R., Pérez, E. Energy-economic purification of n-hexane from low benzene concentrations via extractive distillation with propylene carbonate as solvent: a comparative study with liquid-liquid extraction processes. *Sep. Purif. Technol.* 2025, 361(1), 131348. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131348>
16. Market Research Future. Glycerol Carbonate Market. Disponible en: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/glycerol-carbonate-market-26072> (Consultado el 07/05/2025)
17. Market Research Future. Propylene Carbonate Market. Disponible en: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/propylene-carbonate-market-8089> (Consultado el 07/05/2025)
18. Markets and Markets. Ethylene Carbonate Market. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/ethylene-carbonate-market-229766138.html> (Consultado el 07/05/2025)

# Suscríbete a nuestro canal de You Tube



*"La química nos une"*

[www.sqm.org.mx](http://www.sqm.org.mx)  
[soquimex@sqm.org.mx](mailto:soquimex@sqm.org.mx)



Julia Liliana Rodríguez Santillán<sup>1</sup>, Ricardo Santillán Pérez<sup>2</sup>, Iririana Martínez Sánchez<sup>3</sup>

## RESUMEN

Las películas delgadas funcionales, como las basadas en polivinilpiridinas (PVP), ofrecen soluciones innovadoras en áreas como protección solar, eficiencia energética y tratamiento de agua. En particular, combinadas con óxidos metálicos como óxidos de zinc y titanio (ZnO y TiO<sub>2</sub>), las PVP forman películas fotoactivas capaces de degradar contaminantes orgánicos mediante fotocatalisis. En estudios recientes, películas de P(4-VP)-ZnO eliminaron hasta el 81% del colorante anaranjado de metilo, gracias a su estructura homogénea y eficientes interacciones moleculares. Estas películas son fáciles de recuperar y reutilizar, superando limitaciones de los métodos convencionales. Además de su eficacia en tecnología ambiental, tienen aplicación potencial en dispositivos inteligentes, sensores y ventanas electrocrómicas, posicionándose como materiales clave frente a problemas de contaminación y cambio climático.

### Vinilpiridinas: la maravilla de las películas fotoactivas

Cuando hablamos de “películas” en la vida cotidiana, muchas veces pensamos en entretenimiento; sin embargo, en el ámbito científico, las películas también hacen referencia a capas delgadas de materiales con propiedades funcionales. Estas películas, aunque invisibles o casi imperceptibles por su grosor micrométrico, tienen aplicaciones tecnológicas que van desde la protección de superficies hasta el tratamiento ambiental. Su diseño, funcionalización y nuevas combinaciones con nanomateriales están marcando una revolución silenciosa en diversos campos, en especial en el tratamiento de agua contaminada. En este contexto, las PVP surgen como una plataforma prometedora para la creación de películas fotoactivas con aplicaciones ambientales y tecnológicas.

### ¿Qué son las películas funcionales y por qué importan?

Las películas son materiales finos, muchas veces translúcidos, que se colocan sobre superficies para modificarlas o protegerlas. Son parte integral de la vida moderna: se usan en vidrios de automóviles y ventanas de edificios para bloquear radiación ultravioleta, en pantallas de celulares para prevenir rayaduras, o como capas de seguridad frente a robos o accidentes (Figura 1). Una innovación reciente en esta área son las ventanas inteligentes o electrocrómicas, que cambian de color al aplicar una corriente eléctrica. Estas permiten regular la entrada de luz y calor, y pueden ser controladas incluso mediante dispositivos remotos. Su incorporación en edificaciones ha demostrado potencial para reducir el consumo energético, en especial en iluminación y climatización. De hecho, se estima que los edificios consumen hasta un 40% de la energía global.

<sup>1</sup>Laboratorio de Investigación en Ingeniería Química Ambiental, ESQIE-IPN; <sup>2</sup>Laboratorio de Polímeros, ESQIE-IPN; <sup>3</sup>BIOFLEX Empaques flexibles

<sup>1</sup>[jlrodriguez@ipn.mx](mailto:jlrodriguez@ipn.mx), <sup>2</sup>[rsantillan@ipn.mx](mailto:rsantillan@ipn.mx), <sup>3</sup>[iririana@gmail.com](mailto:iririana@gmail.com)



Figura 1. Ejemplos del uso de películas de polímero en la vida cotidiana. Fuente: elaboración propia.

Las películas también pueden tener usos ambientales importantes. Una aplicación emergente de gran interés es su incorporación en sistemas de tratamiento de agua, una necesidad urgente considerando la escasez y contaminación de este recurso, acentuada por el cambio climático.

### El desafío del agua contaminada y la necesidad de nuevos materiales

En México, los efectos del cambio climático se manifiestan en sequías extremas, inundaciones y hundimientos del suelo. La disponibilidad de agua limpia es cada vez más crítica, y el tratamiento de aguas contaminadas es una prioridad. Las aguas residuales pueden contener contaminantes como colorantes sintéticos, metales pesados, microplásticos, virus, bacterias, residuos farmacéuticos y pesticidas.

Tradicionalmente, se han usado materiales adsorbentes como el carbón activado u óxidos metálicos, pero tienen desventajas: baja capacidad de adsorción, escasa posibilidad de ajuste funcional, difícil reciclaje y una eficiencia limitada al solo transferir los contaminantes de una fase a otra. Una alternativa mucho más eficaz son los procesos de oxidación avanzada (POAs). Estos sistemas generan radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ), moléculas altamente reactivas que degradan contaminantes orgánicos hasta transformarlos en CO<sub>2</sub>, agua y sales. Aunque altamente efectivos, muchos de los materiales utilizados en POAs se presentan en forma de polvo, lo que complica su recuperación y reutilización.

En este contexto, los materiales en forma de películas se presentan como una opción prometedora. No sólo son más fáciles de manejar y recuperar, sino que también permiten una aplicación directa y sostenida sobre flujos de agua o superficies contaminadas.

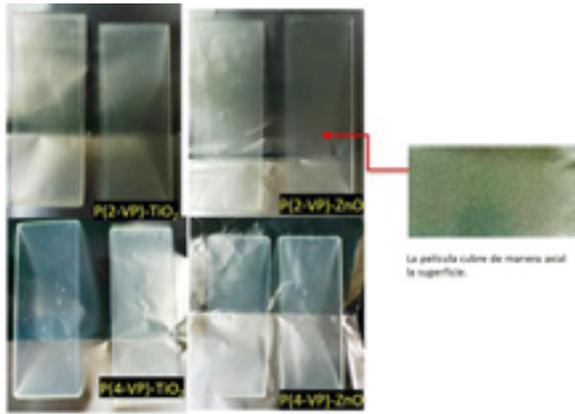


Figura 2. Películas obtenidas mediante la síntesis con vinilpiridina y un óxido metálico. Fuente: elaboración propia.

### Polivinilpiridinas: estructura, propiedades y potencial

Las PVP son polímeros derivados de la piridina, que tienen un amplio uso en aplicaciones electrónicas, sensores, liberación controlada de fármacos y adsorción de contaminantes. Existen principalmente dos tipos: poli(2-vinilpiridina) (P(2-VP)) y poli(4-vinilpiridina) (P(4-VP)), dependiendo de la posición en la que se une el grupo vinil al anillo aromático de piridina.

Una característica fundamental de las PVP es la presencia de átomos de nitrógeno en su estructura, los cuales permiten interacciones de tipo iónico, coordinaciones con metales y formación de enlaces por puentes de hidrógeno. Además, pueden ser cuaternizadas (es decir, modificadas para adquirir carga eléctrica), lo que las vuelve eficaces en la eliminación de contaminantes aniónicos como cromatos o arseniatos.

Además de sus propiedades químicas, las PVP también presentan ventajas eléctricas. Han sido utilizadas como matrices conductoras en sensores electroquímicos y en la mejora de electrodos para baterías. Su estructura favorece la transferencia de carga y las reacciones redox, lo que las vuelve atractivas para aplicaciones de fotocatalisis ambiental.

### Películas de PVP con semiconductores para tratamiento de agua

En el Laboratorio de Investigación en Ingeniería Química Ambiental (LAIQA) de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE), se ha trabajado en el desarrollo de películas compuestas de PVP con materiales semiconductores, en especial óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) (Figura 2). Ambos materiales son conocidos por su capacidad fotocatalítica: al ser irradiados con luz, generan especies reactivas que oxidan contaminantes en agua.

Para fabricar estas películas, se usó la técnica de deposición por centrifugado (spin-coating), la cual permite obtener películas delgadas, homogéneas y bien adheridas. La polimerización se hizo en solución para facilitar la incorporación de las nanopartículas inorgánicas dentro de la matriz polimérica.

Las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  tienden a formar agregados y generar grietas en las películas de P(2-VP), lo que podría limitar su eficacia. En contraste, las películas de P(4-VP)- $\text{ZnO}$  mostraron una distribución uniforme de los agregados, sin formación de grietas. Esta estructura más homogénea favorece la interacción entre el semiconductor y el contaminante, así como la transmisión de electrones durante el proceso fotocatalítico.

### Evaluación en la remoción del anaranjado de metilo

Para evaluar la eficacia de estas películas, se eligió el colorante anaranjado de metilo (AM) como contaminante modelo. Este compuesto es común en la industria textil, alimentaria, farmacéutica y papelería. Aunque se use en concentraciones bajas, tiene un alto impacto ambiental, ya que reduce la penetración de luz en cuerpos de agua, afectando la fotosíntesis acuática y disminuyendo el oxígeno disuelto.

En pruebas realizadas bajo irradiación, la película de P(4-VP)- $\text{ZnO}$  logró eliminar el 81% del anaranjado de metilo en sólo cinco horas (Figura 3). Esta alta eficiencia se atribuye a la buena dispersión del  $\text{ZnO}$ , así como a la interacción intermolecular entre las cadenas poliméricas y las nanopartículas. Es probable que los pares de electrones libres del nitrógeno en la piridina formen enlaces por puentes de hidrógeno con la superficie hidratada del  $\text{ZnO}$ , creando canales de transferencia de carga más eficientes. Por otro lado, en el caso de P(2-VP), la posición del átomo de nitrógeno dificulta dichas interacciones.

Un beneficio adicional de este sistema es la facilidad de recuperación de la película, lo que la hace reutilizable y práctica para aplicaciones a mayor escala.

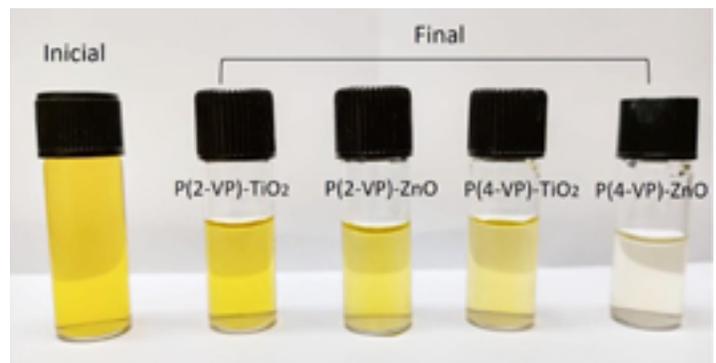


Figura 3. Decoloración del AM en presencia de las películas compuestas de PVP y un óxido metálico. Fuente: elaboración propia.

### Conclusiones y perspectivas

El desarrollo de películas compuestas de polivinilpiridinas con óxidos metálicos representa un avance importante en la búsqueda de materiales eficientes, accesibles y sostenibles para el tratamiento de agua contaminada. Estas películas no sólo eliminan colorantes tóxicos como el anaranjado de metilo, sino que pueden ser optimizadas para atacar una gran variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Gracias a su alta eficiencia, estabilidad, facilidad de recuperación y potencial de reutilización, las películas fotoactivas de PVP- $\text{ZnO}$  ofrecen una alternativa real frente a los métodos tradicionales de tratamiento. Además, su versatilidad abre la posibilidad de aplicaciones futuras en sensores, electrodos avanzados, ventanas inteligentes y tecnologías híbridas con inteligencia artificial.

El reto ahora es continuar perfeccionando su síntesis, mejorar su durabilidad, explorar su escalabilidad industrial y evaluar su efectividad frente a mezclas complejas de contaminantes. Con estos avances, las películas basadas en polivinilpiridinas podrían convertirse en una herramienta clave dentro del arsenal tecnológico para enfrentar la crisis del agua y avanzar hacia un desarrollo más sostenible.



*Boletín de la Sociedad Química de México*