



## Mario Molina: Un formador de nuevas generaciones y un investigador de nuestro tiempo

*Mario Molina: A 'maestro' of new generations and a researcher of our time*

Enrique Rodolfo Bazúa-Rueda<sup>1</sup> y María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa<sup>2</sup>

### Resumen

Se presenta una breve reseña sobre las dos facetas más trascendentes de la vida de Mario Molina, como a él le gustaba que lo llamaran: La de formador de jóvenes y no tan jóvenes interesados en la protección del ambiente y la de investigador, en toda la extensión de la palabra, tomando de todos los que lo antecedieron y convivieron con él, el conocimiento y, a través de su agudo cerebro, comprender el fenómeno químico más importante que se ha logrado explicar y resolver en los últimos cincuenta años.

#### Palabras clave:

Mario Molina, maestro, investigador.

### Abstract

A brief review is presented on the two most important facets of Mario Molina's life, as he liked to be addressed: that of a 'maestro' of young and not so young people interested in protecting the environment and that of a researcher, throughout the extension of the word, taking knowledge from all those who preceded him and lived with him, and through his keen brain to understand the most important chemical phenomenon that has been explained and resolved in the last fifty years.

#### Keywords:

Mario Molina, 'maestro', researcher

<sup>1</sup>Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, UNAM. Contacto: [erbr@unam.mx](mailto:erbr@unam.mx)

<sup>2</sup>Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, UNAM. Contacto: [mcduran@unam.mx](mailto:mcduran@unam.mx)

## Introducción

La reseña que aquí se presenta destaca por provenir de dos amigos cercanos de Mario Molina y de su alma gemela Luisa Tan Molina. Así, se hace un recuento de su vida desde la óptica de quienes convivimos con ellos desde los inicios de su carrera académica en Berkeley y con quienes Mario y Luisa Molina mantuvieron una amistad hasta el fin de la vida terrena de Mario y seguimos manteniéndola con Luisa.

Este año, el pasado 19 de marzo, debería el Dr. Mario Molina haber cumplido 78 años. El destino de todos los seres vivos de nuestro planeta lo llevó a adelantarse en ese camino el pasado 7 de octubre de 2020 cuando, como todas las personas buenas, falleció sin sufrir una larga enfermedad.

Más que repetir su biografía, ya ampliamente publicada en todos los medios de comunicación, este artículo se enfocará a dos de sus facetas más importantes: Su contribución a la formación de profesionales de excelencia y comprometidos con el bienestar de la sociedad en su conjunto y su contribución al conocimiento basado en su propia formación académica que él enriqueció con los conocimientos autodidactas que fue adquiriendo a lo largo de sus años de escolaridad, después como post-doctorante en la Universidad de California en Irvine y en el resto de su vida profesional. Este artículo tiene la intención, esperamos, de servir como material educativo para adentrarnos en los pasos que seguimos cuando queremos resolver un problema complejo, tomando toda la información y conocimientos disponibles y postulando posibles caminos de solución.

### Primera faceta: Su contribución a la formación de profesionales de excelencia

Desde que los autores conocieron al entonces estudiante doctoral Mario Molina y su pareja sentimental y profesional durante más de 30 años, su esposa desde julio de 1973, Luisa Tan Molina, en la Universidad de California en Berkeley en 1969 cuando llegamos para realizar nuestros estudios de posgrado, pudimos constatar su enorme interés por la ciencia.

Durante la primera Navidad en Berkeley en 1969, todos hablábamos de nuestros maestros, nuestros proyectos de investigación y nuestro entorno y con ello aprendíamos sobre lo que cada uno de nosotros hacía y, sobre todo, pensaba sobre lo que ocurría en el mundo: La búsqueda de los jóvenes de un mundo mejor para todos los que lo habitamos, ya que entonces todos teníamos menos de 30 años. Estábamos inmersos en el “radical center” de los Estados Unidos escuchando, al cruzar por Sproul Hall, a Bob Dylan y a Angela Davis y comprendiendo el origen del racismo y de todo lo relacionado con la intolerancia, que parece ser una característica que no hemos podido superar desde que “nos bajamos del árbol o algunos se cayeron de él” como solía decir otro ‘ex-Berkeleyano’, el entonces también estudiante doctoral y después investigador del Instituto de Astronomía de la UNAM, Luis Carrasco-Bazúa.

Tuvimos varias anécdotas de este racismo que, afortunadamente, sorteamos con bien con el apoyo de personas buenas, que también existen en todo el planeta y que son muchas más que las malas personas.

Pero, lo importante a lo largo de esos años formativos en la Universidad de California en Berkeley fue el reconocimiento de la necesidad de formar profesionales de excelencia comprometidos con la sociedad en su conjunto.

El Dr. Mario Molina siempre que podía, buscaba apoyar a su primer *Alma mater*, la UNAM. En la Tabla 1 se presenta una sinopsis de sus diferentes viajes a México para dar conferencias que buscaban encender la llama de los jóvenes sobre la protección de nuestra casa (lo que significa literalmente ecología, el estudio de nuestra casa, la Tierra).

Lapso	Actividad académica
1969-1972	Navidad en Berkeley, California (24/Dic/1969). Allí convivimos los mexicanos que estábamos estudiando por allá: Mario y Luisa Molina, Raúl y Cristina Carvajal, Paco y Maru Barnés, Joaquín y Magda Curiel y nosotros. A partir de allí nos unió una amistad que, aunque algunos de ellos se nos hayan adelantado en el camino que todos seguiremos, siguen vivos en nuestro corazón y nuestra mente (Fotografía 1)
1973	En Santa Cruz, California. Por primera vez nos habló de lo que pensaba que podría estar ocurriendo en la alta atmósfera con lo que estaban Luisa y él trabajando con el Prof. “Sherry” Rowland y, para Enrique y para mí, fue un maravilloso descubrimiento que podría explicar el que no aumentara la concentración de freones en la baja atmósfera porque se estaban difundiendo hacia la alta atmósfera. A Enrique y a mí, en particular, nos pareció que la parte ambiental era extraordinariamente importante y que nos debíamos dedicar todos a estudiarla para evitar un cataclismo mundial. Enrique empezó a ver la parte del ahorro y uso eficiente de la energía con sus aplicaciones de la termodinámica y yo a ver cómo reducir el impacto de la contaminación del agua empezando desde los más cotidiano, el uso eficiente del agua en la industria del maíz diseñando una nueva tecnología que no consumiera tanta agua y que tuviera los mismos resultados que la nixtamalización tradicional, hasta lo que ahora estudiamos en la UNAM 50 años después.
1974	Regreso de Berkeley a México de la última pareja de amigos “ex-Berkeleyanos”
1974-1984	Artículo trascendental: Nature y seguimiento y defensa ante la sociedad hasta la firma del Protocolo de Montreal en 1984 por parte del Dr. Mario Molina y seguimiento experimental por parte de la Dra. Luisa Tan Molina
1984-1988	Seguimos en contacto con Mario y Luisa durante su estancia en los Jet Propulsion Laboratories de Pasadena, California. Y su siempre amable amistad quedó demostrada ayudándonos cuando nuestro hijo Enrique Guillermo sufrió un accidente en su ojo derecho, prestándonos incluso uno de sus automóviles para llevarlo al Hospital de la Universidad de California para ver si le salvaban su ojo derecho
1989	Creación oficial del <b>Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental</b> : invitación a formar parte de este programa de la Facultad de Química de la UNAM como parte de su consejo asesor. Junio de 1989
1989	Participación activa en el <b>Primer Simposio Internacional de Química Ambiental y de la Tercera Reunión de Investigadores Universitarios en Contaminación Ambiental</b> en colaboración con las Dras. Liliana Saldívar y Silvia Castillo y el Dr. Joan Genescá de la Facultad de Química, con la Dra. Teresa Fortoul de la Facultad de Medicina y con la M. en C. Margarita Eugenia Gutiérrez de Echeverría del Instituto de Geografía de la UNAM, bajo los auspicios de la Embajada de la RFA y la Fundación Mexicana para la Salud (a través de la embajada de los EE. UU. en México), del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y de las propias Facultades de Medicina y Química y del Instituto de Geografía de la UNAM. Noviembre 27-28, 1989 CONFERENCIA MAGISTRAL, MARIO MOLINA

**TABLA 1.** Invitaciones académicas al Dr. Mario Molina a México (1969-2004) por parte de la “Fundación” Bazúa-Durán.

1991	<p><b>Primer seminario internacional sobre química ambiental atmosférica</b> (first international workshop on environmental atmospheric chemistry) realizado en el marco de las ceremonias del 75° Aniversario de la Fundación de la Facultad de Química de la UNAM a través del Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM (PIQAYQA) y el Instituto Tecnológico de Massachusetts de los EEUU (Dres. Mario y Luisa Molina), bajo los auspicios del IMP, de la empresa Du Pont de México, de la Fundación Universo XXI (Embajada de EE.UU.), de la Subsecretaría de Ecología de la Sedue, del Centro de Ciencias de la Atmósfera a través de la Coordinación de la Investigación Científica, de la Dirección General de Intercambio Académico y de la Facultad de Química de la UNAM. México D.F., México. Enero 14-18, 1991 (Fotografía 2, Salón Edificio C, Facultad de Química). DR. MARIO MOLINA fue co-ORGANIZADOR y presentó una CONFERENCIA MAGISTRAL, invitando a los investigadores más connotados en ese momento a participar, los Dres. Jack Calvert, Ken L. Demerjian, Barbara Finlayson-Pitts, Jim Pitts y Robert Sievers</p>
1991	<p><b>Segundo Simposio Internacional de Química Ambiental, de la Cuarta Reunión de Investigadores Universitarios en Contaminación Ambiental y del Segundo Seminario Internacional de Expertos en Tratamiento Biológico de Efluentes Industriales</b>, en colaboración con las Dras. Liliana Saldívar, Silvia Castillo, las M. en C. Dolores Lastra y Rosa María Ramírez Gama y el Dr. Joan Genescá de la Facultad de Química y con la M. en C. Margarita Eugenia Gutiérrez-de-Echeverría del Instituto de Geografía de la UNAM, bajo los auspicios de las empresas Du Pont de México, Olivetti Mexicana y Cobre de México, de la Organización de los Estados Americanos, del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, del Departamento del Distrito Federal, de la Subsecretaría de Ecología de la Sedue, de la Dirección General de Intercambio Académico, de la Coordinación de la Investigación Científica, de la Facultad de Química y del Instituto de Geografía de la UNAM. México D.F., México. Septiembre 11-13, 1991 en el marco de los eventos del 75 aniversario de la Fundación de la Facultad de Química, además, presentó una CONFERENCIA MAGISTRAL EN LA UNAM, MARIO MOLINA</p>
1993	<p><b>Tercer Simposio Internacional de Química Ambiental y de la Tercera Reunión Internacional de la Red Ambiental de América Latina (RAQAL)</b>, con la coordinación global de la M. en C. Margarita Eugenia Gutiérrez-de-Echeverría del Instituto de Geografía de la UNAM y de la Dra. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa de la Facultad de Química, bajo los auspicios de las empresas Du Pont de México, de la Organización de los Estados Americanos, del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, del Departamento del Distrito Federal, del Instituto Nacional de Ecología, del Gobierno del Estado de Oaxaca, de la Dirección General de Intercambio Académico, de la Coordinación de la Investigación Científica, de la Facultad de Química y del Instituto de Geografía de la UNAM. Se le otorgó un diploma por sus excelentes investigaciones sobre la protección de la atmósfera de nuestro planeta firmado por las organizadoras. Oaxaca, Oax., México. Octubre 25-29, 1993 (Fotografía 3, Teatro Macedonio Alcalá) Había obtenido el ingreso a la Academia de Ciencias de los Estados Unidos Conferencia Magistral, Mario Molina</p>
1995	<p>OBTENCIÓN DEL GALARDÓN: PREMIO NOBEL DE QUÍMICA 1995: Octubre 11, 1995 (Fotografía 4, en el MIT al ser notificados del galardón). Compartido con los Dres. Sherwood Rowland y Paul Crutzen (ambos también ya fallecidos)</p>

1995	Celebraciones y visitas en la Ciudad de México: Patio de la Facultad de Química, laboratorios en la Ciudad Universitaria y en el jardín de la casa de la Familia Bazúa-Durán (Fotografías 5a,b,c,d)
1997	<b><i>Tercer Seminario Internacional de Expertos en el Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos</i></b> en cooperación con el Departamento del Distrito Federal, las Comisiones Nacional del Agua y Federal de Electricidad, los Institutos mexicano de Ingenieros Químicos y Nacional de Ecología, las Secretarías de Relaciones Exteriores y de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, el Ministerio Federal de Asuntos Exteriores de Austria y el Ministerio Federal de Ciencia Investigación y Transporte de Austria, la Universidad BOKU de Viena (Universidad de Agricultura, Recursos Forestales y Recursos Naturales Renovables de Viena) y el PIQAYQA-FQ-UNAM. Entidad anfitriona: SEMARNAT-MÉXICO. México D.F. y Jiutepec, Mor., México. Abril 3-9, 1997 (Fotografía 6, frente al Salón de Actos de la SEMARNAP, que lleva el nombre de José Mario Molina-Pasquel y Enríquez)  Dedicatoria del Salón de Actos “Mario Molina” del Edificio de la SEMARNAT Conferencia Magistral, Mario Molina
1997	XXXVII Convención Nacional del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. IMIQ, Directiva Nacional. Coatzacoalcos, Ver., México. Septiembre 10-13, 1997 Conferencia magistral de Mario Molina por medios virtuales (siendo entonces algo sumamente novedoso)
1998-2003	Contactos más personales debido a la agenda de los Dres. Mario y Luisa Molina y solamente viéndonos cuando el Proyecto <b>MILAGRO</b> en México les permitía momentos de descanso y una vez en San Francisco para recordar los lares de los sesenta y setenta del Siglo Veinte aprovechando que Mario y Luisa Molina irían para allá a un evento académico
2003	Creación del Centro Mario Molina en la ahora Ciudad de México, entonces México D. F., México, por parte de Mario y Luisa Molina, donde egresados de la Facultad de Química y otras instituciones nacionales y extranjeras iniciaron y consolidaron sus carreras profesionales en el área de ingeniería ambiental. Simultáneamente, fundaron en paralelo el Molina Center for Energy and Environment, MCE <sup>2</sup> en La Jolla, San Diego, California, a cargo de la Dra. Luisa Tan Molina ya que el Dr. Mario Molina era profesor en la Universidad de California, San Diego, EE.UU.
2003	<b><i>Cuarto Seminario Internacional de Expertos en el Tratamiento de Efluentes Industriales (Líquidos y Gaseosos) y Residuos</i></b> . En cooperación con la Universidad de Guanajuato, el Gobierno del Distrito Federal, las Comisiones Nacional del Agua y Federal de Electricidad, los Institutos Mexicano de Ingenieros Químicos y Nacional de Ecología, las Secretarías de Relaciones Exteriores y de Medio Ambiente y Recursos Naturales, el Ministerio Federal de Asuntos Exteriores de Austria y el Ministerio Federal de Ciencia, Investigación y Transporte de Austria, la Universidad BOKU de Viena (Universidad de Agricultura, Recursos Forestales y Recursos Naturales Renovables de Viena) y el PIQAYQA-FQ-UNAM. México D.F. abril 9-11, 2003. Dres. Mario y Luisa Molina: Conferencia magistral, Mario Molina Organizadora de la mesa redonda de Química Atmosférica, Luisa Molina
2003-2004	Proyecto <b>MILAGRO</b> : Un paradigma de la investigación transdisciplinaria y multinacional dirigido y ejecutado por los Dres. Mario Molina y Luisa Tan Molina en México, donde se formaron innumerables profesionales de excelencia de todo el planeta.

2004	<b><i>Tercer Minisimposium Internacional Sobre Remoción de Contaminantes de Atmósfera, Aguas y Suelos</i></b> bajo los auspicios del Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental de la UNAM, para la celebración de su XV Aniversario, UNAM (Oficina de Cooperación Internacional y Facultad de Química), Universidad de Guanajuato, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Universidad Veracruzana (Xalapa), Universidad BOKU de Viena, SRE, ITESM (Campus México). Julio 7-10, 2004. México D. F. México (Fotografía 7) Dres. Mario y Luisa Molina: Conferencistas magistrales y organizadores de la mesa redonda de Química Atmosférica
2005-2013	Contactos más personales debido a las agendas separadas de los Dres. Mario y Luisa Molina
2014	Invitados especiales a la Ceremonia de los L Años de haber ingresado a la Ahora Facultad de Química de la UNAM. Generación 1964-1968. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México. Febrero 8, 2014. Palabras como invitado de honor en el Auditorio A de la Facultad de Química, Dr. Mario Molina
2015-2020	Continuaron los contactos más personales debido a las agendas separadas de los Dres. Mario y Luisa Molina El Dr. Mario Molina siguió impartiendo Conferencias Magistrales al haber sido nombrado PROFESOR en la Facultad de Química

Desde que Mario y Luisa Molina, Raúl y Cristina Carvajal, Paco y Maru Barnés, Joaquín y Magda Curiel y nosotros salimos de Berkeley, siendo los últimos nosotros, siempre que podíamos los invitábamos a realizar alguna actividad académica y mantener el contacto amistoso (Fotografía 1). La Dra. Luisa Tan Molina lo acompañaba siempre que podía (hay que recordar que tenían un hijo pequeño y, además, se quedaba a cargo del laboratorio). Cuando venía Mario solo lo traíamos del aeropuerto al Pedregal de San Ángel donde se quedaban con su hermano Roberto. Cuando venían ambos los llevábamos al hotel más cercano al evento académico.



**FOTOGRAFÍA 1.** Mario Molina, Enrique Bazúa y Raúl Carvajal en la Navidad de 1970 en la casa de los Barnés-Regueiro en la “Albany University Village” de la Universidad de California en Berkeley.

En todos estos eventos académicos, la formación de recursos humanos era lo más trascendente. Los estudiantes asistían por el interés del ambiente y, aunque el Dr. Molina todavía no obtenía el Premio Nobel, los temas que abordaba despertaban un enorme interés.

Por ejemplo, en los eventos para celebrar los 75 años de la Facultad de Química, el primero en enero y luego en septiembre de 1991, siendo director el Dr. Francisco Barnés, asistieron muchos estudiantes. Algunos de ellos fueron a completar su formación a los laboratorios del Instituto de Tecnología de Massachusetts, MIT, donde se encontraban ya los Dres. Mario y Luisa Molina desde 1989. La Dra. Telma Castro, ahora directora del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, hizo su tesis doctoral de esta forma (Fotografía 2).

En la Fotografía 3 estamos justamente al terminar la ceremonia de inauguración en el Teatro Macedonio Alcalá de la ciudad de Oaxaca con estudiantes de nuestros laboratorios del entonces PIQAYQA del Tercer Simposio Internacional de Química Ambiental y de la Tercera Reunión Internacional de la Red para Análisis de Química Ambiental para América Latina (RAQAL) auspiciada por colegas europeos, que luego se transformó en Red para Análisis de la Calidad Ambiental para América Latina y el Caribe (RACAL) y cuando en 2013 volvimos a ser sede de este evento con el valioso apoyo de la fraternal Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, se creó la de filial de México (RACAM).

**FOTOGRAFÍA 2.** En el Salón 1 del Edificio C de la Facultad de Química al terminar el Primer Seminario Internacional sobre Química Ambiental Atmosférica (First International Workshop on Environmental Atmospheric Chemistry) realizado en el marco de las ceremonias del 75° Aniversario de la Fundación de la Facultad de Química de la UNAM. Destacan en la primera fila los conferencistas del Seminario con los organizadores y parte de los participantes: De izquierda a derecha: Ken Demerjian, Jack Calvert, Carmen Durán de Bazúa, Mario Molina, Barbara Finlayson-Pitts, Jim Pitts, Margarita Eugenia Gutiérrez, Bob Sievers, Rafael Villalobos-Pietrini, María Esther Ruiz Santoyo (Enero 18, 1991).



**FOTOGRAFÍA 3.** Teatro Macedonio Alcalá en Oaxaca. Izq. a der. de pie arriba: Salvador Alejandro Sánchez Tovar, Víctor Manuel Luna Pabello, Jimmy A. Cañipa Morales, Mario Molina, Isalia Chávez Sánchez, Margarita Eugenia Gutiérrez Ruiz; en cuclillas en medio: María del Carmen Bazúa Durán, María del Carmen Durán de Bazúa, Fátima Noemí Brindis Olvera; sentados abajo: Rosa María Picazo Hernández, Hilda Rivas Solórzano, Jorge Villatoro Reséndiz (octubre 25, 1993).

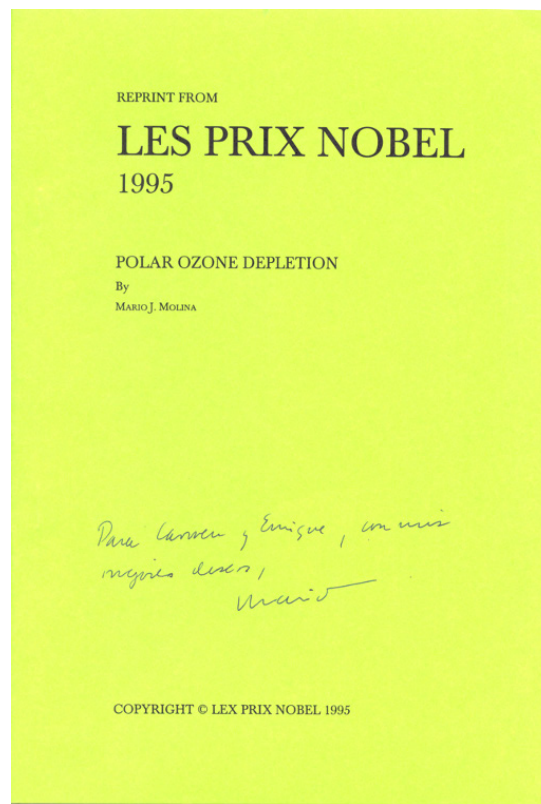


En las Fotografías 4a y b están Mario y Luisa Molina justamente el miércoles 11 de octubre, cumpleaños de Maru Regueiro de Barnés, cuando les notificaron del otorgamiento del Premio Nobel de Química 1995. Ellos obsequiaron a los autores esta fotografía junto con el folleto de la conferencia que dio Mario Molina en Suecia. Quién nos iría a decir que Mario y Maru se nos iban a adelantar en el camino el mismo día, un 7 de octubre (en 2018 Maru y en 2020 Mario).



**FOTOGRAFÍA 4A.** Mario y Luisa en el MIT cuando recibieron la noticia de Suecia, miércoles 11 de octubre de 1995.

**FOTOGRAFÍA 4B.** Conferencia magistral de Mario Molina en Suecia.



Posteriormente, ya habiendo obtenido el Premio Nobel de Química 1995, compartido con los Dres. Sherwood Rowland y Paul Crutzen, vino a la Ciudad de México para recibir el Doctorado *Honoris causa* en el Palacio de Minería y, al salir de ir a almorzar al Café Tacuba, un joven estudiante que salía de la estación Tacuba del Metro se le acercó y le preguntó si él era el Dr. Molina ya que se sentía muy emocionado porque él lo había escuchado en una conferencia en la Facultad de Química y que no daba crédito de que estuviera él, el Premio Nobel, caminando por la calle de Tacuba como cualquier persona.

Después de aquel momento, el Dr. Molina fue comentando que ‘cuándo terminaría la euforia del Premio Nobel’ y todos los que lo acompañábamos le dijimos que nunca, ya que su relevancia era tal que no podría olvidarse.

En esos días se le hizo un homenaje en el patio de la Facultad de Química (Fotografías 5a,b,c,d) y fue a visitar los laboratorios del PIQAYQA en el Conjunto E de la Facultad de Química y los del Centro de Ciencias de la Atmósfera, ambos grupos de laboratorios en la Ciudad Universitaria de la UNAM.



**FOTOGRAFÍA 5A.** En el patio de la Facultad de Química. De izq. a der.: Francisco Bolívar Zapata, Carmen Durán de Bazúa, Mario Molina, José Guadalupe Hernández Hernández, Luisa Tan Molina.



**FOTOGRAFÍA 5B.** Laboratorios del CCA-UNAM: Luisa Tan Molina, Carmen Durán de Bazúa, Mario Molina, Alfonso Durán Moreno, José Luis López Martínez.



**FOTOGRAFÍA 5C.** Celebrando el Premio Nacional de la Juventud 1995 de María del Carmen Bazúa Durán con Mario Molina y Carmen Durán de Bazúa en el jardín de la casa de la familia Bazúa-Durán en Tlalpan.



**FOTOGRAFÍA 5D.** Laboratorios del Edificio E-3 de la Facultad de Química, UNAM: Carmen Durán de Bazúa con PIQAYQita, Martha Patricia García Camacho, Mario Molina y tres estudiantes del Dr. Alfonso Durán (foto tomada por Luisa Tan Molina).

A pesar de los múltiples compromisos que tenía ya habiendo sido galardonado con el Premio Nobel de Química 1995, siempre estaba dispuesto a venir a México.

En 1997, la Maestra Julia Carabias, entonces Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, junto con otras entidades mexicanas y austríacas, auspició la realización del Tercer Seminario Internacional de Expertos en el Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos donde se inauguró la Sala de Usos Múltiples de la Semarnap con su nombre (Fotografía 6).

Y, unos meses después, que no podía hacerlo, justamente en septiembre de 1997, por primera vez usó una tecnología que ahora es tan común, dando una videoconferencia encontrándose él en los Estados Unidos. En Coatzacoalcos, Veracruz, lo escuchamos los participantes de la Convención Nacional de Ingenieros Químicos, así como en diferentes instituciones educativas del país donde se contaba con salas de videoconferencia, como se les llamaba entonces y que eran muy costosas y, por ello, muy escasas.

**FOTOGRAFÍA 6.**  
SEMARNAP, Sala de Usos Múltiples: Sergio Álvarez, Carmen Durán de Bazúa, Luisa Tan Molina, Mario Molina, Leonor Molina-Pasquel y Lajous, Julia Carabias Lilo (secretaria de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca), Francisco Barnés de Castro, María Eugenia Regueiro de Barnés (Abril 3, 1997).



Pasados los años, los Dres. Mario y Luisa Molina decidieron formar dos Centros donde pudiera continuarse con la investigación aplicada al beneficio de la humanidad y en los que pudieran formarse jóvenes deseosos de seguir la misma filosofía. Uno se fundó en la Ciudad de México y el otro en La Jolla, cerca de San Diego ya que él había sido nombrado profesor de la Universidad de California en San Diego. Estando en la Ciudad de México Mario y Luisa Molina planearon la Campaña denominada **MILAGRO** que fue un paradigma para la humanidad. Su significado: **Megacity Initiative: Local and Global Research Observations**, lo dice todo. Se inició en 2003 y en 2006 tuvo su apoteosis.

Hay una página electrónica sobre esta maravillosa campaña (<http://www.troposfera.org>), del 24 de febrero de 2006, así como el libro final de 136 páginas con los principales resultados ([descargar libro](#)). En la Página-e del Centro de San Diego están muchas de las contribuciones que, como parte de esos resultados, se han publicado en revistas indizadas por los participantes de esa venturosa acción realizada por la pareja que se pensaba que sería indisoluble: Mario Molina-Luisa Tan Molina.

Justamente, de la página-e del MCE<sup>2</sup> San Diego (<http://www.mce2.org/Inthenews/MILAGRO>) se tomó lo siguiente para los lectores de este artículo:

*“... es el primer proyecto de colaboración internacional enfocado en caracterizar la exportación de contaminantes atmosféricos generados en megaciudades. La campaña de mediciones de campo fue auspiciada por la Fundación Nacional de la Ciencia (NSF), el Departamento de Energía (DOE) la Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los Estados Unidos, y por muchas instituciones mexicanas, incluyendo la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Comisión Ambiental Metropolitana del Valle de México (CAM), el*

*Consejo Nacional de la Ciencia y Tecnología (CONACYT) y Petróleos Mexicanos (PEMEX). En total incluyó la participación de más de 150 instituciones de México, Estados Unidos y Europa, reuniendo a más de 450 investigadores y técnicos de 30 nacionalidades diferentes.*

En una revista que guarda un recuerdo especial de los Dres. Mario y Luisa Molina y del Dr. Andoni Garritz, siendo los dos últimos La Dra. Luisa Tan Molina y el Dr. Andoni Garritz, parte de su Consejo Editorial, hay un resumen de esto (Bernal-González, 2020), señalando en su presentación lo escrito sobre las cuatro campañas de **MILAGRO**.

Otro bello recuerdo es el de la celebración del XV Aniversario de la fundación del Programa de Ingeniería Química Ambiental en 2004 con un evento académico, el Tercer Minisimposium Internacional sobre Remoción de Contaminantes de Atmósfera, Aguas y Suelos en la Ciudad Universitaria dirigido a colegas y estudiantes (Fotografía 7).



**FOTOGRAFÍA 7.** Fotografía panorámica de 2004 (XV Aniversario del PIQA y QA). 1ª fila: Una colega, Federico García, dos colegas, María Antonieta Aladro, Yolanda Castells, Carmen Bazúa-Durán, Enrique Rodolfo Bazúa-Rueda, Carmen Durán de Bazúa, María Teresa Gutiérrez de MacGregor, Mario Molina, Luisa Tan Molina, Santiago Capella, Francisco J. Barnés, José Sarukhán, Adela Castillejos, Landy Ramírez, Laura Bertha Reyes, Estela Civit, dos colegas; 2ª fila: Ronny Flores, tres colegas, Julio A. Solís Fuentes, Manuel Enríquez Poy, Alfonso Durán Moreno, Ana María Gómez Solares, Thangarasu Pandiyan, Mario Casarrubias, un colega, Telma Castro, otro colega, Juan L. Steimle, un colega, Tania M. Tavares, Rudolf Braun, Raimund Haberl, Isabel Kreiner, una colega, Peter Hauschnik, dos colegas; 3ª fila: Eneidino Varela Montellano, un colega, Norma García Navarro, Adriana Armenta Domínguez, un estudiante, Arturo Rodríguez Cruz, otro estudiante, Aída Viridiana Vargas Zavala, Pável Castillo Guajardo, Rolando S. García, Marisela Bernal González, Luis Rendón, un colega, un estudiante, Ernesto Adrián Maya Jasso, Luis Gerardo López Atamoros, una estudiante (Julio 7, 2004)

Esta Tabla 1 es un compendio de la relación personal y académica con los Dres. Mario y Luisa Tan Molina desde 1969 hasta 2004 y con quienes continuamos teniendo amistad, pero, de manera separada, de 2006 hasta el fallecimiento del Dr. Mario Molina en 2020 y que continúa con la Dra. Luisa Tan Molina en el centro gemelo MCE<sup>2</sup>, en La Jolla, San Diego, California. Puede visualizarse con claridad ese enorme compromiso de ambos por la formación de personas que quieran dar todo su esfuerzo para mejorar la calidad de vida de todos y todas en la sociedad y pensando siempre en que esta viene con el bienestar de nuestro planeta Tierra. La Dra. Molina continuó, mientras contó con el apoyo de los tres niveles de gobierno de México con una segunda campaña, esta vez de concientización y formación de niños(as) y jóvenes mexicanos(as), denominada **Hagamos un milagro por el aire**, de la que persisten numerosos testimonios a lo largo y ancho del país.

Tras la terminación de su relación sentimental de más de 30 años con la Dra. Molina, el Dr. Mario Molina cambió su residencia a la Ciudad de México donde continuó apoyando a la formación de profesionales a través de uno de los centros que habían formado, el de la Ciudad de México y la Dra. Luisa Tan Molina desde el de San Diego.

Su inesperado fallecimiento trajo, justamente, la percepción a nivel de todos y todas quienes convivimos con él de su altruismo, su honestidad, su compromiso con la sociedad en su conjunto y, sobre todo, con la protección del ambiente que nos rodea.

### **Segunda faceta: Su contribución al conocimiento basado en su propia formación académica**

La atracción de Mario Molina por la química estuvo presente desde su infancia. Cuando optó por una carrera profesional escogió Ingeniería química en la Facultad de Química de la UNAM por su interés, ya desde entonces, por la fisicoquímica. Su tesis de licenciatura, que sustentó en su examen profesional en 1965, la desarrolló en el Instituto de Química de la UNAM y lleva por título “Columnas combinadas en cromatografía en fase vapor”. Muestra con claridad su interés por la investigación experimental en fisicoquímica.

Sus estudios de doctorado en la Universidad de California en Berkeley fortalecen su devoción por la fisicoquímica y su dedicación a estudios fundamentales de reacciones químicas. Se incorpora al grupo del profesor George C. Pimentel, quien había obtenido varios premios por el desarrollo del primer *laser*<sup>1</sup> químico. Con él desarrolla experimentos para entender la dinámica molecular utilizando justamente *laser* químicos, establecer estructuras moleculares de las especies transitorias y la distribución de energía interna de los productos de reacciones químicas y fotoquímicas. Obtiene el doctorado en fisicoquímica en 1972. Su interés por desarrollar investigaciones útiles para la sociedad comienza a estar presente desde ese entonces y, tomando sus propias palabras:

*“Fue también en esos años que tuve mi primera experiencia en relación con el impacto de la ciencia y la tecnología en la sociedad. Recuerdo que me impresionó el hecho de que en otros lugares se estaban desarrollando láseres químicos de alto poder para fines bélicos: Deseaba participar en investigaciones que fueran útiles para la sociedad y no que derivaran en resultados potencialmente destructivos”* (Tomada de Mario Molina, [semblanza autobiográfica](#)).

Una vez concluido el doctorado ingresó como posdoctorante al grupo del profesor Sherwood Rowland en la Universidad de California en Irvine. El proyecto que escogió, tomando nuevamente sus propias palabras:

*“el proyecto que más me atrajo consistía en averiguar el destino de ciertos productos químicos industriales muy inertes —los clorofluorocarbones (CFC)— que se habían estado acumulando en la atmósfera, y que no parecían tener para entonces ningún efecto significativo en el ambiente.”* (Ibidem).

Los resultados de este proyecto lo publicaron Mario J. Molina y F. S. Rowland en la revista “Nature” el 28 de junio de 1974 con el título: **“Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone”**. El resumen, tomado textualmente del artículo, dice lo siguiente:

<sup>1</sup> Acrónimo de *light amplification by the stimulated emission of radiation* (Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación)

*“Chlorofluoromethanes are being added to the environment in steadily increasing amounts. These compounds are chemically inert and may remain in the atmosphere for 40-150 years, and concentrations can be expected to reach 10 to 30 times present levels. Photodissociation of the chlorofluoromethanes in the stratosphere produces significant amounts of chlorine atoms, and lead to the destruction of atmospheric ozone.” (Molina and Rowland, 1974).*

Este trabajo prendió la alarma sobre el efecto nocivo de los CFC en la destrucción de la capa de ozono estratosférico que protege a todas las formas de vida en el planeta. La disminución del ozono estratosférico tenía consecuencias catastróficas y podía significar el fin de la vida en el planeta si no se actuaba pronto. Esta señal de alarma fue secundada por muchos investigadores de todo el mundo pero, al mismo tiempo, fue atacada por muchos que no creían en las conclusiones o veían una amenaza a sus intereses económicos. Las conclusiones del trabajo se basaron en información y trabajos previos sobre los CFC y en varias hipótesis soportadas en el conocimiento que tenían sobre reacciones moleculares elementales y los mecanismos de difusión atmosférica. Su formación como ingeniero químico y, sobre todo, como fisicoquímico fueron esenciales. Convencido de los efectos de estas sustancias químicas en la estratosfera con las pruebas reales acopiadas por las sondas de los “*Jet Propulsion Laboratories*” de Pasadena, California y, venciendo su timidez natural, “cabildó” a congresistas, a empresarios, a organizaciones no gubernamentales y, en general, a la nación estadounidense, entonces la mayor consumidora de estas sustancias, los clorofluorocarburos y otras sustancias similares basadas también en halógenos (como los compuestos de bromo usados en las espumas contra incendio), para alertarlos del daño que podrían causar al ambiente global de nuestro planeta. Las hipótesis fueron ampliamente corroboradas con extenso trabajo experimental de muchos grupos de investigación en las siguientes dos décadas. Finalmente, la sólida evidencia científica y la voluntad política de muchos que se convencieron de que había que actuar pronto y coordinadamente a nivel mundial, incluido nuestro Subsecretario de Ecología, el Fis. Sergio Reyes Luján (quien también se nos adelantó en el camino ahora con la pandemia de Covid-19), llevaron a la firma en 1987 de lo que se conoce como el ‘Protocolo de Montreal’, el acuerdo mundial de mayor relevancia para la protección del ambiente y la vida:

*“El Protocolo de Montreal es un acuerdo ambiental internacional que logró ratificación universal para proteger la capa de ozono de la Tierra, con la meta de eliminar el uso de sustancias que agotan la capa de ozono (SAO). De otro modo, aumentaría el riesgo de que altos niveles de radiación ultravioleta penetren en la Tierra, lo que daría lugar a una mayor incidencia de cáncer de piel y cataratas oculares, afectaría los sistemas inmunológicos y tendría efectos negativos en las cuencas hidrográficas, las tierras agrícolas y los bosques. Desde su adopción en 1987 y a partir de finales de 2014, se ha eliminado con éxito más del 98% de las SAO controladas, lo que ha ayudado a revertir los daños a la capa de ozono. Un beneficio colateral muy importante es que, durante el período 1989-2013, se han reducido las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> en 135.000 millones de toneladas. Sin embargo, siguen existiendo retos importantes. La transición de los CFC (alto potencial de agotamiento de la capa de ozono, o PAO) a los HCFC intermedios (con un PAO más bajo) se ha completado, y la transición final es pasar a alternativas que tienen un nivel PAO de cero. El desafío es desarrollar/seleccionar alternativas (principalmente en refrigeración, aire acondicionado y productos de espuma) que también sean amigables con el clima.” (Tomado de PNUD, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo).*

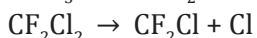
En los siguientes puntos se presentan los antecedentes e hipótesis en que basaron sus conclusiones.

1. La producción, consumo y disposición en la atmósfera de CFC se incrementaba exponencialmente. Los CFC, siendo compuestos muy estables y no tóxicos, eran considerados seguros e inocuos sin daño al ambiente. Por ser químicamente inertes y por su alta volatilidad habían ganado gran aceptación para aplicaciones tecnológicas en refrigeración, en aire acondicionado, como propelentes en aerosoles y como agentes espumantes en aplicaciones poliméricas.
2. James Lovelock, intrigado sobre los contaminantes atmosféricos, realizó mediciones extensas de CFC en la atmósfera y los encontró en todos los lugares que visitó en un viaje de Inglaterra a la Antártica, aún alejados de centros urbanos.

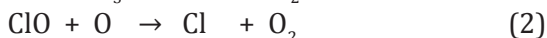
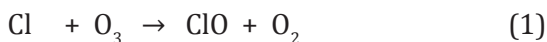
Los resultados los presentó en una conferencia científica de meteorólogos y químicos en 1972 a la que asistió F. S. Rowland.

3. Los resultados llaman la atención de Rowland quien se hace la pregunta: ¿Qué les pasa a los CFC que son enviados a la atmósfera por el consumo diario? Mario Molina toma este proyecto como su trabajo de investigación postdoctoral por el reto que representaba y las implicaciones ambientales.
4. Mario Molina realiza una investigación documental exhaustiva y de consulta con varios investigadores sobre los CFC para determinar los posibles destinos y su eventual degradación.
5. Los compuestos  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  y  $\text{CFCl}_3$  habían sido detectados en la troposfera en concentraciones de 10 y 6 partes en  $10^{11}$  en volumen (Lovelock, 1971). Realiza un balance de materia y concluye que pueden ser explicadas con base en la producción mundial de estos compuestos a la fecha y, por su casi nula reactividad química e insolubilidad en agua, pueden estar presentes en la atmósfera por mucho tiempo.
6. La pregunta sigue en pie ¿A dónde van los CFC que son vertidos a la atmósfera? Al no encontrar un posible receptor en la troposfera, se aventuran a postular la hipótesis siguiente:

El destino más probable de los CFC es llegar a la estratosfera y participar en reacciones fotolíticas de descomposición por la acción de la luz ultravioleta a altitudes entre 20-40 km:



Los átomos de cloro liberados participan en reacciones catalíticas en cadena que llevan a la destrucción neta de ozono ( $\text{O}_3$ ) y oxígeno atómico ( $\text{O}$ ), ampliamente presentes en la estratosfera:



La reacción (2) restablece el átomo de cloro que participa en la reacción (1). La cadena solamente termina cuando el átomo de cloro participa en alguna otra reacción.

Estas reacciones en cadena provocan que un átomo de cloro sea capaz de destruir muchísimas moléculas de ozono.

7. Una vez formulada la hipótesis se abocaron a establecer un modelo atmosférico simple que involucrara los conocimientos existentes sobre reacciones químicas, procesos atmosféricos y niveles de los CFC para determinar el efecto potencial en

la destrucción del ozono estratosférico. El modelo planteado tenía los siguientes elementos:

- a. El modelo solamente consideró la presencia y acción de  $\text{CFCl}_3$  y  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ . Tomaron en cuenta la producción y consumo mundial de  $\text{CFCl}_3$  y  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  que era de 0.3 y 0.5 millones de toneladas por año, respectivamente, y se encontraba en crecimiento sostenido. Estos compuestos eran eventualmente enviados a la atmósfera.
  - b. Consideraron que los CFC enviados a la atmósfera, como consecuencia de las actividades humanas, llegarían a la estratosfera por un mecanismo de difusión de remolinos (“*eddy diffusion*”). Tuvieron que estimar los coeficientes de difusión con base en los conocimientos existentes y tomaron valores entre  $3 \times 10^3$ - $10^4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  a altitudes de 20-40 km. Este tipo de modelos son utilizados extensamente en los estudios atmosféricos.
  - c. Consideraron que los CFC solamente participaban en reacciones fotolíticas de descomposición por la acción de la luz ultravioleta a altitudes entre 20-40 km, ya que a esas altitudes había una gran intensidad de radiación ultravioleta en las longitudes de onda en la ventana pequeña entre 1,750-2,200 Å, apropiadas para romper las moléculas y liberar los átomos de cloro. Con base en el conocimiento disponible, estimaron la rapidez de fotodisociación, a altitudes de 30 km, de  $3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  para  $\text{CFCl}_3$  y  $3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  para  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ , disminuyendo por un factor de  $10^{-2}$  a altitudes de 20 km.
  - d. Consideraron varias reacciones posibles en que pudieran participar los átomos de cloro para terminar las reacciones en cadena de destrucción del ozono. Los cálculos preliminares no indicaron efectos significativos, pero indicaron varias líneas de investigación para reforzar o modificar sus conclusiones.
8. Con base en las hipótesis y estimaciones obtuvieron las siguientes conclusiones:
- a. El pico máximo de producción de átomos de cloro y, por ende, de destrucción de ozono, ocurre a altitudes entre 25-35 km, que es la región de mayor concentración de ozono.
  - b. Los resultados del modelo, considerando las hipótesis del punto anterior:
    - i. Indican que la vida media de  $\text{CFCl}_3$  y  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  está en el intervalo de 40-150 años.
    - ii. Las concentraciones en la atmósfera alcanzarían valores entre 10 y 30 veces los niveles actuales, considerando que los  $\text{CFCl}_3$  y  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  se vierten a la atmósfera al ritmo actual.
    - iii. La disociación del  $\text{CFCl}_3$  y  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  en la estratosfera producen cantidades significativas de átomos de cloro que provocan la destrucción del ozono atmosférico.

Estas predicciones dieron la señal de alarma, Mario y Luisa Molina y muchos investigadores en todo el mundo se dedicaron a realizar experimentos y mediciones para corroborar o modificar las hipótesis y mejorar las predicciones. Muchos se dedicaron a refinar los modelos atmosféricos que estudiaban la destrucción del ozono estratosférico, Sin duda, uno de los hallazgos más relevantes fue encontrar la acción catalítica de las partículas de hielo en las nubes de la antártica para la formación de los átomos de cloro. Ya no había duda, la hipótesis central del artículo de Molina y Rowland era correcta y se debía tomar una acción contundente, la firma del Protocolo de Montreal. Esta historia muestra

cómo la investigación científica con bases sólidas, dedicación y enfoque sirve como base para tomar decisiones trascendentes para la humanidad.

## A manera de conclusiones

Para cerrar este artículo, los autores recomiendan visitar la página web del proyecto “**Understanding Science**” de la Universidad de California.

Los objetivos de este proyecto, copiados textualmente de la página web son:

*“Research indicates that students and teachers at all grade levels have inadequate understandings of the nature of science, which may be traced to classrooms where the nature of science is taught as a simple, linear, and non-generative process. UC Berkeley and the Museum of Paleontology are responding to this need by developing a freely accessible website that will provide an accurate portrayal of the nature of science, as well as tools for teaching associated concepts. This project has at its heart a public re-engagement with science that begins with teacher preparation. To this end, its immediate goals are to (1) improve teacher understanding of the nature of the scientific enterprise and (2) provide resources and strategies that encourage and enable K-16 teachers to incorporate and reinforce the nature of science throughout their science teaching.”<sup>2</sup>*

Uno de los ejemplos que han utilizado para cumplir con los objetivos planteados es el caso de la destrucción de la capa de ozono. Este ejemplo lleva por título: “**Ozone depletion: Uncovering the hidden hazard of hairspray**”, consta de 13 páginas.

Aquí se transcriben textualmente algunos párrafos para reforzar los planteamientos de este artículo.

Página 4: *The devil in the details* (El diablo en los detalles):

*“Though the stereotype of scientific progress is that it's driven by critical new evidence, Molina's breakthrough, like many efforts in science, was a bit different. He didn't perform any experiments or gather any new data. Instead, he took on the tough job of pulling together a lot of existing facts and hypotheses about chemical reactions, atmospheric processes, and CFC levels, to show that if all the individual facts and hypotheses were accurate, the result would be a serious environmental threat. It was the sum of this scientific evidence that provided him with nearly all the information he and Rowland used to form their hypothesis about how CFCs could affect atmospheric ozone. All they had needed to do was to use known chemical theory to calculate an estimate for the long-term effects of CFCs on ozone.”<sup>3</sup>*

<sup>2</sup> Traducción libre: Las investigaciones indican que los estudiantes y maestros de todos los niveles tienen una comprensión inadecuada de la naturaleza de la ciencia, lo que puede atribuirse a las aulas donde la naturaleza de la ciencia se enseña como un proceso simple, lineal y no generativo. La Universidad de California, UC, Berkeley y el Museo de Paleontología están respondiendo a esta necesidad mediante el desarrollo de un sitio web de libre acceso que proporcionará una descripción precisa de la naturaleza de la ciencia, así como herramientas para enseñar los conceptos asociados. Este proyecto tiene en su corazón un nuevo compromiso público con la ciencia que comienza con la preparación del maestro. Con este fin, sus objetivos inmediatos son (1) mejorar la comprensión de los maestros sobre la naturaleza de la empresa científica y (2) proporcionar recursos y estrategias que alienten y permitan a los maestros conocidos como K-16 incorporar y reforzar la naturaleza de la ciencia a lo largo de su enseñanza de ciencias

<sup>3</sup> Traducción libre: Aunque el estereotipo del progreso científico es que está impulsado por nueva evidencia crítica, el avance de Molina, como muchos esfuerzos en la ciencia, fue un poco diferente. No realizó ningún experimento ni recopiló datos nuevos. En cambio, asumió el arduo trabajo de reunir una gran cantidad de hechos e hipótesis existentes sobre reacciones químicas, procesos atmosféricos y niveles de CFC, para demostrar que, si todos los

*“Molina and Rowland’s over-arching hypothesis (that releasing CFCs into the atmosphere would cause significant ozone depletion) was based on many supporting hypotheses (sometimes called auxiliary hypotheses or assumptions). For example, one of the sub-hypotheses contained within the Rowland-Molina hypothesis was how fast chlorine reacts with ozone. These sub-hypotheses were backed up by their own lines of evidence, but also came with their own uncertainties. If a key sub-hypothesis turned out to be false, it could mean that Molina and Rowland’s over-arching hypothesis about ozone depletion was also false. In fact, some scientists were skeptical of the importance of ozone depletion due to CFCs, not because they doubted Molina and Rowland’s work, but because they were skeptical of some of the sub-hypotheses. For example, at the time the paper was published, there was not yet any experimental evidence to support the idea that CFCs would release a chlorine atom when exposed to solar radiation. It did not take long before this hypothesis was checked in a laboratory experiment and confirmed. However, some of the other hypotheses were not so easy to test, and a lot of hard work would be needed to persuade skeptics. Molina and Rowland’s overarching hypothesis relied on many sub-hypotheses.”<sup>4</sup>*

#### Página 13 Conclusions (Conclusiones)

*“Looking back over the scientific investigation of ozone depletion, we can see how the Molina-Rowland hypothesis evolved with new data. When chlorine nitrate, a chemical that ties up chlorine in an ozone-safe form, was added to the hypothesis, the expected amount of ozone loss decreased. Then, when polar clouds were considered, the expected ozone loss increased. Through all these minor revisions, the core of the hypothesis, the idea that CFCs lead to ozone depletion, never changed. Taken out of their scientific context, these fluctuations in expectations about ozone loss might have seemed to indicate that scientists were confused or disagreeing with each other, but on closer inspection, we saw that the fluctuations were a normal part of the scientific process as scientists came to a more complete understanding of an immensely complex system, the atmosphere.”<sup>5</sup>*

hechos e hipótesis individuales fueran precisos, el resultado sería una seria amenaza ambiental. Fue la suma de esta evidencia científica lo que le proporcionó casi toda la información que él y Rowland utilizaron para formular su hipótesis sobre cómo los CFC podrían afectar el ozono atmosférico. Todo lo que tenían que hacer era utilizar la teoría química conocida para calcular una estimación de los efectos a largo plazo de los CFC en el ozono

<sup>4</sup> La hipótesis general de Molina y Rowland (que la liberación de CFC a la atmósfera causaría un agotamiento significativo del ozono) se basó en muchas hipótesis de apoyo (a veces llamadas hipótesis o supuestos auxiliares). Por ejemplo, una de las sub-hipótesis contenidas en la hipótesis de Rowland-Molina era qué tan rápido reacciona el cloro con el ozono. Estas sub-hipótesis fueron respaldadas por sus propias líneas de evidencia, pero también vinieron con sus propias incertidumbres. Si una sub-hipótesis clave resultó ser falsa, podría significar que la hipótesis general de Molina y Rowland sobre el agotamiento del ozono también era falsa. De hecho, algunos científicos se mostraron escépticos sobre la importancia del agotamiento del ozono debido a los CFC, no porque dudaran del trabajo de Molina y Rowland, sino porque eran escépticos sobre algunas de las sub-hipótesis. Por ejemplo, en el momento en que se publicó el artículo, todavía no había ninguna evidencia experimental que respaldara la idea de que los CFC liberarían un átomo de cloro cuando se exponían a la radiación solar. No pasó mucho tiempo antes de que esta hipótesis fuera verificada en un experimento de laboratorio y confirmada. Sin embargo, algunas de las otras hipótesis no fueron tan fáciles de probar y se necesitaría mucho trabajo para persuadir a los escépticos. La hipótesis general de Molina y Rowland se basó en muchas sub-hipótesis

<sup>5</sup> Mirando hacia atrás en la investigación científica del agotamiento del ozono, podemos ver cómo evolucionó la hipótesis de Molina-Rowland con nuevos datos. Cuando se agregó a la hipótesis el nitrato de cloro, una sustancia química que retiene el cloro en una forma segura para el ozono, la cantidad esperada de pérdida de ozono disminuyó. Luego, cuando se consideraron las nubes polares, la pérdida de ozono esperada aumentó. A través de todas estas revisiones menores, el núcleo de la hipótesis, la idea de que los CFC conducen al agotamiento del ozono, nunca cambió. Sacadas de su contexto científico, estas fluctuaciones en las expectativas sobre la pérdida

*“Now the hairspray you see on drugstore shelves is CFC-free, as are the refrigerators in appliance stores, and the air conditioners in new cars and homes. Modifying regulatory policies to bring about these changes was a hard-won battle for politicians and citizens concerned about the environment — and for Molina, Rowland, and many other scientists. Not only did they collect scientific evidence; they also invested a considerable amount of time and energy in conveying their results and the implications to lawmakers and the public. Molina and Rowland had to persist in these efforts for more than a decade before along was finally achieved! With the CFC-ban in place, atmospheric levels of chlorine are beginning to decline, and the ozone layer is, we hope, on its way to recovery. If our current scientific understanding of the situation is correct, the ozone hole will start to shrink significantly by around 2018, with full recovery not expected until around 2070. While Molina and Rowland are given much of the credit — their work has earned them many awards and honors, including the most prestigious award in chemistry, the Nobel Prize — successfully averting an environmental disaster required more than just their efforts. It was the accumulated knowledge of the scientific community that allowed Molina and Rowland to meld a bunch of seemingly disjointed pieces of information into a new hypothesis about the effects of CFCs in the atmosphere. The dire results predicted by their ideas — the depletion of the ozone layer and prospect of increased health and environmental problems — led many scientists to become involved in testing and fine-tuning the hypothesis, with chemists, atmospheric scientists, and mathematical modelers all contributing pieces of the puzzle. These diverse perspectives played a crucial role in the scientific process, allowing science to build a much more complete understanding of the phenomenon than if Molina and Rowland had worked alone. As with many scientific triumphs, this success belongs to no one individual, but to the scientific community as a whole — and to the broader community, which took it upon itself to act on pressing scientific findings.”<sup>6</sup>*

de ozono podrían haber parecido indicar que los científicos estaban confundidos o en desacuerdo entre sí, pero al examinarlos más de cerca, vimos que las fluctuaciones eran una parte normal del proceso científico a medida que los científicos llegaban a una comprensión más completa de un sistema inmensamente complejo, la atmósfera.<sup>6</sup> Ahora, la laca para el cabello que se ve en los estantes de las farmacias no contiene CFC, al igual que los refrigeradores en las tiendas de electrodomésticos y los acondicionadores de aire en los automóviles y hogares nuevos. Modificar las políticas regulatorias para lograr estos cambios fue una batalla duramente ganada para los políticos y ciudadanos preocupados por el ambiente y para Molina, Rowland y muchos otros científicos. No solamente recopilaron evidencia científica; también invirtieron una cantidad considerable de tiempo y energía en transmitir sus resultados y las implicaciones a los legisladores y al público. Molina y Rowland tuvieron que persistir en estos esfuerzos durante más de una década antes de que finalmente se lograra. Con la prohibición de los CFC en vigor, los niveles atmosféricos de cloro están comenzando a disminuir y esperamos que la capa de ozono esté en camino de recuperarse. Si nuestro conocimiento científico actual de la situación es correcto, el ‘agujero’ (adelgazamiento por reducción en su concentración) de ozono comenzará a reducirse significativamente alrededor de 2018 y no se espera una recuperación completa hasta alrededor de 2070. Si bien Molina y Rowland reciben gran parte del crédito, su trabajo les ha valido muchos premios y honores, incluido el premio más prestigioso de química, el Premio Nobel: evitar con éxito un desastre ambiental requirió algo más que sus esfuerzos. Fue el conocimiento acumulado de la comunidad científica lo que permitió a Molina y Rowland fusionar un montón de piezas de información aparentemente inconexas en una nueva hipótesis sobre los efectos de los CFC en la atmósfera. Los terribles resultados predichos por sus ideas, el agotamiento de la capa de ozono y la perspectiva de un aumento de los problemas ambientales y de salud, llevaron a muchos científicos a involucrarse en probar y afinar la hipótesis, con químicos, científicos atmosféricos y modeladores matemáticos, todos contribuyendo con sus piezas para completar el rompecabezas. Estas diversas perspectivas jugaron un papel crucial en el proceso científico, permitiendo que la ciencia construyera una comprensión mucho más completa del fenómeno que si Molina y Rowland hubieran trabajado solos. Como ocurre con muchos triunfos científicos, este éxito no pertenece a un solo individuo, sino a la comunidad científica en su conjunto, y a la comunidad en general, que se encargó de actuar sobre los hallazgos científicos urgentes

Con estos párrafos queda delineada la enorme contribución del Dr. Mario Molina quien, a los 30 años, decidió comprender qué ocurría con los clorofluorocarburos y aplicó sus conocimientos adquiridos de la lectura de muchos autores que lo precedieron y de sus contemporáneos para descifrar el misterio.

Ojalá que esta contribución dé ideas a las y los lectores(as) para lograr que transformemos una sociedad basada en los combustibles fósiles para producir energía en una más avanzada que permita aprovechar la energía del sol en todas sus formas, desde su radiación con las fotoceldas (energía fotovoltaica) hasta las fuerzas gravitacionales que provocan el movimiento del aire (energía eólica) y del agua en los océanos (energía mareomotriz) pasando por la energía térmica del magma (energía geotérmica) alterando lo menos posible la calidad del aire, del agua y del suelo y permitiendo que los seres humanos junto con el resto de los seres vivos que pueblan nuestro planeta no vean afectadas sus condiciones de vida y usemos esos combustibles fósiles para crear otros satisfactores para mejorar la calidad de vida de la sociedad contaminando lo menos posible.

¡Que esta pandemia nos indique cómo coexistir inteligentemente con la naturaleza a través de nuestra formación académica!

## Referencias

- Bernal-González, M. Editora-en-jefe. (2020). Presentación. ATSM. 8(2):81-84.
- Lovelock, J.E. (abril, 9 de 1971). Atmospheric Fluorine Compounds as Indicators of Air Movements. *Nature*, (230), 379. <https://www.nature.com/articles/230379a0.pdf?origin=ppub>
- Mario J. Molina. (2002). Nobel UNAM. <http://www.nobel.unam.mx/molina/index.html>
- Molina Center for Energy and Environment (2009). *Informe Final. Análisis y síntesis de los resultados de las Campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006 para su uso en la formulación de estrategias en materia de cambio climático y contaminación local en la ZMVM*. (Convenio No. INE/ADE-051/2009). [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire-2011-2020-anexos/documentos/6-docs\\_estudio\\_luisa\\_molina.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire-2011-2020-anexos/documentos/6-docs_estudio_luisa_molina.pdf)
- Molina, Luisa T., Madronich, Sasha, Gaffney Jeffrey S. y Singh, Hanwant B. (s.f.). La Campaña MILAGRO/INTEX-B. Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente, 1-15. [http://www.mce2.org/Inthenews/MILAGRO%20Overview%20\(IGAC%20newsletter\)esp.pdf](http://www.mce2.org/Inthenews/MILAGRO%20Overview%20(IGAC%20newsletter)esp.pdf)
- Molina, Luisa T., Molina, Mario J., Volkamer, Rainer, de Foy, Benjamin, Lei, Wenfang, Zavaka, Miguel, & Velasco, Erik. *Characterization of Fine Particulate Matter (PM) and Secondary PM Precursor Gases in the Mexico City Metropolitan Area*. United States. <https://doi.org/10.2172/940956>
- Molina, M.J., Rowland, F.S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, (249), 810-812.
- PIQAYQA. (1995). *Folleto informativo de la creación del Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental en 1989*. UNAM, Facultad de Química e Instituto de Geografía. Financiado por la UNAM y la GTZ. México.

*Presentado Milagro, proyecto de estudio de la calidad del aire en México DF.* (2006, 24 febrero). Troposfera. <https://www.troposfera.org/index.php?mact=News,cntnt01,print,0&cntnt01articleid=1325&cntnt01showtemplate=false&cntnt01returnid=39>

*Programa de Ingeniería Química Ambiental.* (2021, junio). Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental. <https://ambiental.unam.mx>

*Protocolo de Montreal | PNUD.* (2021). UNDP. <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development/environment-and-natural-capital/montreal-protocol.html>

Seigneur, C., Dennis. R.L. Atmospheric Modeling. (2011). 1<sup>st</sup> Chapter 9, G.M. Hidy, J.R. Brooks, K.L. Demerjian, L.T. Molina, W. Pennell, and R.D. Scheffe (ed.). Technical Challenges of Multipollutant Air Quality Management. *Springer Science+Business Media B.V.*, Dordrecht, Netherlands, 1(1), 299-337.

Understanding Science team. (s. f.). *Ozone depletion: Uncovering the hidden hazard of hairspray.* [https://undsci.berkeley.edu/article/ozone\\_depletion\\_01](https://undsci.berkeley.edu/article/ozone_depletion_01)

*Understanding Science.* (s. f.). Understanding Science. <https://ucmp.berkeley.edu/understandingscience/index.php>