

CALEIDOSCOPIO KALEIDOSCOPE

Nace para focalizar la atención del lector en un tema de interés actual mediante una serie de artículos cortos en torno al tema.
Born to focus reader attention on a topic of current interest through a series of short articles on the subject.

EN TORNO A LOS REFRIGERANTES

Autor correspondiente/ Corresponding author: Arturo Romero Salvador

Académico Numerario de la RAC. Sección de Físicas y Químicas

Con la colaboración de Arturo Romero, *Restricciones que impulsan la evolución de los refrigerantes*; María Carmen Collado Amores, *El frío una herramienta esencial en la cadena alimentaria*; David P. Serrano Granados, *Termodinámica de los sistemas de refrigeración y propiedades de los refrigerantes*; Carmen Nájera Domingo, *Síntesis de moléculas utilizadas como refrigerantes*. Herramientas actuales para seleccionar moléculas candidatas a refrigerantes y Alfonso Sáiz López, *Historia de los descubrimientos que permitieron demostrar que el descenso de la concentración de ozono en la estratosfera era causado por los CFC*.



Mediante la refrigeración se logra disminuir o mantener la temperatura de un cuerpo o de un espacio. Con este proceso termodinámico se consigue extraer

energía térmica del objeto y, mediante un fluido encargado de transportarla, denominado refrigerante, llevarla hasta otro lugar capaz de aceptarla.



Se utiliza este procedimiento para lograr una gran variedad de objetivos. Por ejemplo, la climatización de espacios habitados para alcanzar un grado de confort térmico, la conservación de productos, como alimentos, medicamentos, órganos, etc., que se degradan cuando el nivel de temperatura sobrepasa un valor, en equipos cuyo funcionamiento correcto requiere mantener una temperatura o en operaciones industriales que deben reducir la temperatura para obtener productos.

El refrigerante es una sustancia o mezcla, normalmente un fluido, que se utiliza en el ciclo térmico y experimenta una transición de fase reversible, de líquido a gas y viceversa. Refrigeradores, aires acondicionados, bombas de calor, calentadores de agua y muchos otros dispositivos utilizan refrigerantes como fluido mediador para transferir energía térmica entre fuentes y receptores.

Desde el inicio de la refrigeración mecánica hasta la actualidad han ido cambiando los criterios de elección de los refrigerantes. En las diez primeras décadas (1830-1930) se utilizaban aquellos refrigerantes que habían demostrado su funcionamiento en alguna aplicación. Los ingenieros encargados de diseñar el sistema prestaban poca atención, en comparación con otros componentes internos, a la elección del refrigerante. Normalmente se limitaban a establecer la capacidad, especificaciones de funcionamiento y características que debían cumplir las tuberías, alimentación y equipo de control, y basaban la selección del refrigerante en el coste, rendimiento, representación local del fabricante y opciones de servicio, preferencias operativas y percepción de fiabilidad.

Se produjo el primer cambio, impulsado por algunos accidentes graves, a partir de los años 30. Durante el periodo 1930-1990 se desarrolló una nueva generación de refrigerantes que aportaban mayor seguridad y durabilidad, pero su emisión a la atmósfera generó un grave problema ambiental. Los requisitos para el empleo de un compuesto como refrigerante cambiaron otra vez en 1987, con el acuerdo internacional del Protocolo de Montreal para la protección de la capa de ozono, y posteriormente con el Protocolo de Kioto sobre cambio climático.

Los nuevos refrigerantes deben conseguir un equilibrio entre objetivos ambientales contrapuestos y entre estos y la seguridad y compatibilidad con los materiales de los equipos, superando los límites que

se establezcan para la protección ambiental, eficiencia, toxicidad, inflamabilidad y coste.

Este documento analiza el tema de la refrigeración, desde cinco de sus múltiples facetas, con el fin de mostrar la complejidad que supone disponer de un producto, refrigerante, adecuado para emplearlo en los equipos que satisfacen la demanda de frío. Partiendo de las restricciones que han impulsado la evolución de los refrigerantes se examina la necesidad de frío en la cadena alimentaria, la termodinámica de la refrigeración y las propiedades de los refrigerantes, la síntesis de moléculas utilizadas como refrigerantes y las herramientas actuales para seleccionar moléculas candidatas y, finalmente, la historia de los descubrimientos que permitieron demostrar que el descenso de la concentración de ozono en la estratosfera era causado por los CFC.

RESTRICCIONES QUE IMPULSAN LA EVOLUCIÓN DE LOS REFRIGERANTES

Arturo Romero Salvador¹

1. Académico Numerario de la RAC. Sección de Físicas y Químicas

Entre los veinte logros más importantes que ha conseguido la ingeniería del siglo XX se encuentra la refrigeración. La demanda de refrigeración y de aire acondicionado representa un casi el 20% del consumo total de energía en el mundo (Kitanovski et al. 2015). Los refrigerantes son los fluidos que se utilizan en el ciclo de refrigeración para transportar la energía del foco frío al foco caliente.

En la antigüedad se conocían y utilizaban procedimientos naturales para disponer de frío como el almacenamiento de nieve en invierno o el empleo de botijos (vasijas de barro poroso). La refrigeración artificial comenzó cuando se construyeron máquinas capaces de enfriar fluidos. Estos equipos necesitaban un refrigerante que les hiciera funcionar correctamente y, además, que estuviera disponible. En esta búsqueda aparecieron una serie de fluidos: amoníaco, dióxido de carbono, dióxido de azufre, propano, cuyas características termodinámicas son adecuadas para utilizarlos como refrigerantes.

Durante el primer cuarto del siglo XX, la refrigeración se aplicó principalmente en entornos industriales para la fabricación de hielo. Los refrigeradores domésticos que se introdujeron en el mercado a finales de los años 20 utilizaban como refrigerantes dióxido de azufre, amoníaco, formiato de metilo, cloruro de metilo, todos ellos son fluidos inflamables y tóxicos. Se consideraba que el propano era un refrigerante seguro porque no era tóxico y que el amoníaco o el dióxido de azufre eran fácilmente manejables porque, debido a su olor característico, se podían percibir a concentraciones muy bajas en caso de escape.

Los primeros fabricantes de refrigeradores domésticos pusieron de manifiesto la necesidad que tenía su actividad de disponer de nuevos refrigerantes con puntos de ebullición entre 0 y -40°C , que fueran estables pero que no fueran ni tóxicos ni inflamables.

Midgley asumió el reto planteado y analizó los elementos de la tabla periódica para centrar su trabajo en el tipo de compuestos que, en principio, cumplían los requisitos (Midgley y Henne, 1930). Eliminó los que formaban productos no volátiles (metales), los que tenían puntos de ebullición muy bajos (gases nobles) y los elementos no metálicos que formaban productos inestables o tóxicos. En consecuencia, los candidatos debían buscarse en compuestos que sólo contuvieran estos ocho elementos: hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno, flúor, cloro, azufre y bromo. A partir de ellos se obtendrían compuestos para desplazar, por seguridad y durabilidad, a los refrigerantes que se habían empleado inicialmente, refrigerantes de la primera generación

Fueron apareciendo los compuestos clorofluorocarbonos y a partir de 1930 se comenzó la comercialización de los nuevos refrigerantes, diclorofluorometano (R-12) y triclorofluorometano (R-11). Había comenzado la incorporación de los refrigerantes de la segunda generación, también conocidos como freones, por el nombre de la marca registrada por uno de sus principales fabricantes. En los años siguientes se fueron sintetizando y comercializando nuevos compuestos clorofluorocarbonos (CFC) y otros pertenecientes a la familia de hidroclorofluorocarbonos (HCFC). Uno de los más extendidos a partir de 1950 fue el R-22 (clorodifluorometano) que se utilizó para dar servicio de aire acondicionado. También se utilizaron mezclas de CFC y HCFC que formaban un azeótropo y, por ello, podían manejarse del mismo modo que un solo componente. Con estos azeótropos se

pretendía disponer de refrigerantes con mayor capacidad de refrigeración por unidad de volumen o que sus características se adaptaran a las necesidades de la aplicación a la que iban destinados.

Con todos estos avances, los CFC y HCFC se impusieron en el mundo de la refrigeración hasta 1990. De los refrigerantes pertenecientes a la primera generación, sólo se mantuvo el amoníaco en aplicaciones industriales, cámaras frigoríficas, cervecerías, etc.

Pronto, los CFC y HCFC diseñados y fabricados para la función de refrigeración encontraron utilidades en otros campos. Durante varias décadas se fue generalizando su empleo como agentes espumantes, disolventes para limpieza, propulsores de productos de aseo personal entre otras muchas aplicaciones. Generalmente, su destino, una vez utilizado, era la atmósfera.

Lovelock a mediados de los años setenta llegó a la conclusión de que casi todo el R-11 y R-12 emitido permanecía la atmósfera. Como eran compuestos que permanecían inalterados, no reaccionaban con los componentes de la atmósfera y no perturbaban el medio ambiente (Lovelock et al. 1973). A partir de esta interpretación, se aceptó que su presencia en la atmósfera no implicaba ningún peligro. Sin embargo, Molina y Rowland propusieron que los CFC tenían un sumidero en la estratosfera, donde se disociaban por la radiación ultravioleta generando cloro atómico que reaccionaría con el ozono (Molina y Rowland 1974). Los estudios encaminados a comprobar esta hipótesis y el descubrimiento del denominado "agujero de ozono" (descenso de su concentración) llevaron a la adopción del Protocolo de Montreal, en 1987, sobre Sustancias que Agotan la Capa de Ozono. Se prohibieron los CFC y varios HCFC y la industria tuvo que emprender la tarea de buscar nuevos refrigerantes, esta vez orientados hacia la protección de la capa de ozono.

Aquellas moléculas candidatas a formar la tercera generación de refrigerantes, debían considerar su efecto en la formación del "agujero de ozono". Por ello, además de cumplir con los requisitos termodinámicos y de estabilidad en el sistema de refrigeración, deberían superar los criterios relacionados con la salud, la seguridad y el medioambiente. Los compuestos que ofrecían la mejor combinación de propiedades eran los HFC y HCFC de uno o dos átomos de carbono. Partiendo de una lista de más de 800 productos químicos industriales se seleccionaron 51 candidatos de los que 49 están constituidos por los elementos que



había identificado Midgley. Se implantaron refrigerantes basados en HFC que fueron sustituyendo a los CFC que habían sido prohibidos por el Protocolo de Montreal.

La contribución de los refrigerantes al calentamiento global se conocía desde 1980 pero la prioridad era reemplazar a los que reducen la concentración de ozono, es decir los CFC. La creciente preocupación por el calentamiento global y el aumento de las emisiones de HFC impulsaron un acuerdo para reducirlas. Se estimó que estos gases contribuirían a un aumento de la temperatura de la superficie del planeta unos 0,35 K a finales de siglo si se mantenía el escenario de utilización. En el marco del Protocolo de Montreal se acordó que era preciso reducir los HFC en un 85% con el fin de que su contribución al aumento de temperatura no superara 0,06 K. El acuerdo entró en vigor en 2019 y comenzó el desarrollo de refrigerantes de la cuarta generación, generación de "calentamiento global".

Los nuevos refrigerantes deben dar respuesta al conjunto de restricciones y, además, deben ser sostenibles para lo que es preciso que tengan una vida útil elevada, que sea posible su reciclado y que el consumo de materias primas para su síntesis sea bajo. Los fabricantes han seguido un camino similar al que siguieron cuando tuvieron que desplazar a los CFC (McLinden et al. 2017). Primero, revisaron los productos que ya conocían para proponer candidatos. Aparecieron las hidrofluoroolefinas (HFO) que tienen una vida media en la atmósfera inferior a los HFC y por tanto, menor Poder de Calentamiento Global. Después, emprendieron la búsqueda sistemática del refrigerante "ideal", definiendo sus propiedades termodinámicas fundamentales, determinando las propiedades de las sustancias químicas a partir de su estructura química, simulando el comportamiento en un ciclo de compresión de vapor y, finalmente, el cumplimiento de las restricciones, estabilidad química, toxicidad, Poder de Calentamiento Global, etc.

La mayor parte de las 29 moléculas seleccionadas están constituidas por los ocho elementos químicos que ya habían sido identificadas en la búsqueda de los refrigerantes de segunda y tercera generación. Como en esta selección sólo han aparecido unos pocos compuestos como nuevos candidatos, es muy probable que actualmente se conozcan todos los compuestos que pueden utilizarse como refrigerantes. La industria de la refrigeración debe olvidar el refrigerante "ideal" y buscar una aproximación con

aquellos productos que respondan de manera equilibrada a todas y cada una de las crecientes y cambiantes restricciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Kitanovski, A., Plaznik, U., Tomc, U., Paredos, A. (2015). Present and future caloric refrigeration and heatpump technologies. *International Journal Refrigeration*, 57, 288–298.
2. Lovelock, J. E., Maggs, R. J., Wade, R. J. (1973). Halogenated hydrocarbons in and over the Atlantic. *Nature*, 241, 194–196.
3. McLinden, M. O., Brown, J. S., Brignoli, R., Kazakov, A. F., Domanski, P. A. (2017). Limited options for low-global-warming-potential refrigerants. *Nature Communications*, 8, 14476.
4. Midgley, T., Henne, A. L. (1930). Organic fluorides as refrigerants. *Industrial & Engineering Chemistry*, 22, 542–545.
5. Molina, M. J., Rowland, F. S. (1974.) Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalyzed destruction of ozone. *Nature*, 249, 810–812.

EL FRÍO: UNA HERRAMIENTA ESENCIAL EN LA CADENA ALIMENTARIA

María Carmen Collado Amores¹

1. Instituto de Agroquímica y Tecnología de los Alimentos. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. (IATA-CSIC)

El uso del frío es una de las técnicas más antiguas empleadas por la humanidad para conservar los alimentos. Desde el principio de los tiempos, se empleaba la nieve, hielo natural y cuevas frías para alargar la vida útil de ciertos alimentos perecederos (carne, pescados y otros productos). Sin embargo, sur a partir del siglo XIX, con el desarrollo de la refrigeración artificial (máquinas de hielo), cuando el frío se consolidó como un pilar fundamental en la cadena alimentaria

moderna, impulsando su expansión a nivel industrial y doméstico a lo largo del siglo XX y que actualmente sigue en desarrollo.

Hoy en día, la conservación por frío ya sea mediante refrigeración o congelación, desempeña un papel esencial en la seguridad alimentaria y la reducción del desperdicio. Estas técnicas permiten preservar los alimentos, retrasar el desarrollo de microorganismos alterantes y/o patógenos, así como mantener la calidad nutricional y sensorial de los productos.

DE LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS AL HOGAR: LA CADENA DE FRÍO

El frío es fundamental en todas las fases de la cadena alimentaria: desde la producción y recolección, envasado, transporte, almacenamiento, distribución y consumo doméstico. Toda esta cobertura donde el frío es clave, se define como “cadena de frío”, y cualquier ruptura en esta cadena puede afectar a la calidad y la seguridad de los alimentos. Por ello, las normativas actuales exigen controles rigurosos de la temperatura, la trazabilidad y la calidad, lo que ha impulsado innovación tecnológica en sensores, sistemas de monitorización digital y/o controles específicos a nivel logístico.

A nivel doméstico, en el hogar, el frigorífico es un aliado imprescindible para conservar los alimentos y es uno de los electrodomésticos más ampliamente utilizados. No solo retrasa su deterioro, sino que también ayuda a preservar el sabor, textura, color y los nutrientes esenciales como proteínas, vitaminas y ácidos grasos, al ralentizar reacciones químicas y enzimáticas. El producto sigue manteniendo la calidad y evitar su alteración y protección ante el crecimiento de bacterias. Los procesos frigoríficos y de congelación que utilizan los frigoríficos domésticos utilizan temperaturas bajas para inhibir el crecimiento, la reproducción y las actividades metabólicas de ciertos microorganismos alteradores y, en algunos casos, causantes de enfermedades como *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp. o *Escherichia coli*, disminuyendo el riesgo de padecer una intoxicación alimentaria.

Es por eso que los frigoríficos actuales ofrecen distintos rangos de temperaturas diferentes: refrigeración (0-8 °C), indicada para alimentos frescos de consumo próximo, y el de congelación (-18-20 °C)

para almacenamientos más prolongados. El almacenamiento correcto según el tipo de alimento y su tiempo de consumo no solo mejora la seguridad alimentaria, sino que también contribuye a reducir el desperdicio de alimentos, un desafío global.

BASES MICROBIOLÓGICAS DE LA CONSERVACIÓN POR FRÍO

Los alimentos son ecosistemas ricos en nutrientes donde coexisten bacterias, hongos, levaduras, algunas con potencial patógeno y otras simplemente alterantes. Uno de los factores que más condiciona su desarrollo es la temperatura, ya que controla la actividad y la proliferación de estos microorganismos.

- Temperatura ambiente (18-20°C). Las bacterias mesófilas, causantes de una gran parte de las enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs), tienen máximos y óptimos crecimientos en temperaturas calidas.
- Refrigeración (0-4°C): Al descender la temperatura por debajo de 10 °C, su multiplicación se ralentiza, deteniéndose casi por completo cerca de 0 °C. Sin embargo, especies psicrótrofas como *Listeria monocytogenes* o *Yersinia enterocolitica* pueden crecer incluso en condiciones de refrigeración, lo que las convierte en un riesgo en productos listos para consumo.
- Congelación (≤ -18 °C): A estas temperaturas, los microorganismos no pueden crecer ni reproducirse debido a la reducción de la actividad acuosa (a_w), la cristalización intracelular y la desestabilización de estructuras celulares. No obstante, la congelación no elimina todos los patógenos: muchos permanecen en estado latente y pueden reactivarse tras la descongelación, especialmente si esta se realiza de forma inadecuada.

LA CADENA DE FRÍO: EJE DE LA SEGURIDAD ALIMENTARIA

Más allá de alcanzar la temperatura adecuada de conservación, lo crucial es mantenerla sin interrupciones durante todo el recorrido agroalimentario.



Una ruptura en la cadena de frío puede comprometer la calidad e incluso activar microorganismos previamente inactivos. Las fluctuaciones y cambios en la temperatura pueden acelerar la alteración del alimento y favorecer la reactivación de bacterias patógenas. Por ejemplo, *Listeria monocytogenes* duplica su población cada 1–2 días a 4 °C, pero lo hace mucho más rápido a 8–10 °C. En ese contexto, un cuidado y control especial durante el transporte, almacenamiento y distribución deben asegurar condiciones térmicas específicas, constantes y monitorizadas. La regulación normativa sobre microorganismos en alimentos se basa en criterios microbiológicos establecidos por la normativa europea (Reglamento (CE) 2073/2005) y el Codex Alimentarius, y es implementada en España a través de regulaciones como el Real Decreto 1021/2022. Estas normas definen límites para microorganismos patógenos y de alteración, así como para sus toxinas, con el objetivo de garantizar la seguridad alimentaria y la calidad higiénica de los alimentos desde la producción hasta el consumidor. Además, existe una regulación normativa para microorganismos en alimentos congelados en España se rige por normativas europeas y españolas, como el Reglamento (CE) n° 2073/2005 y el Real Decreto 1109/1991 sobre alimentos ultracongelados, que establecen que la temperatura de -18°C o inferior inactiva los microorganismos, pero no los destruye, por lo que es crucial mantenerla durante toda la cadena de frío para garantizar la seguridad alimentaria.

Por ello, la industria agroalimentaria recurre a tecnologías como termógrafos digitales, sensores IoT, etiquetas inteligentes (TTI) y sistemas de trazabilidad basados en blockchain, permiten un seguimiento detallado de la cadena de frío y la rápida identificación de fallos. En la industria agroalimentaria, estas prácticas se incluyen dentro de los sistemas de control de calidad como el sistema HACCP (Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control).

INTERACCIÓN DEL FRÍO CON OTRAS BARRERAS DE CONSERVACIÓN

La refrigeración y congelación son más eficaces cuando se combinan con otras estrategias de conservación (técnicas de barreras o obstáculos (*hurdle technology*)), que se aplican para controlar el deterioro de la calidad de los alimentos. Estas pueden incluir:

- Reducción de la actividad de agua a_w (mediante salado, azucarado o deshidratación parcial).
- Acidificación (pH bajo).
- Atmosferas modificadas (con CO₂, N₂ o reducción de O₂)
- Uso de aditivos conservantes (naturales o sintéticos).
- Procesos térmicos suaves previos (pasteurización).
- Tecnologías emergentes: pulsos eléctricos, luz ultravioleta, etc.

La sinergia entre estas barreras permite mantener controlada la carga microbiana y prolongar la vida útil de los alimentos refrigerados o congelados.

IMPACTO EN SOSTENIBILIDAD Y SEGURIDAD ALIMENTARIA GLOBAL

La conservación por frío también juega un papel clave en la sostenibilidad: ayudando en la reducción del desperdicio de alimentos, y las pérdidas postcosecha y tras producción de alimentos. Según la FAO, hasta un 30% de los alimentos se pierden por conservación inadecuada, especialmente en regiones con infraestructura deficiente. Por ello, reforzar y fortalecer las cadenas de frío en zonas rurales o regiones cálidas podría mejorar la seguridad alimentaria global y reducir la presión sobre los recursos naturales. No obstante, el uso intensivo de refrigeración/congelación también plantea retos y desafíos medioambientales: consumo energético elevado, emisiones refrigerantes con alto potencial de calentamiento global (GWP). Esto exige avanzar hacia tecnologías más sostenibles como equipos de alta eficiencia, refrigerantes naturales (CO₂, amoníaco, isobutano), energías renovables y estrategias de refrigeración pasiva. Nuevos retos relacionados con el cambio demográfico y el cambio climático empujan al sector a adaptarse y buscar nuevas soluciones para la calidad y la seguridad de los alimentos a nivel global.

CONCLUSIÓN

La refrigeración y la congelación son herramientas fundamentales de la seguridad alimentaria moderna.

Su aplicación permite mantener la calidad de los alimentos y el control de los microorganismos alterantes y potencialmente patógenos, prolongar la vida útil de los alimentos y reducir el desperdicio. Comprender los fundamentos científicos del frío y su interacción con otras técnicas son clave para optimizar su uso, tanto en la industria agroalimentaria como en el hogar. La innovación tecnológica en este campo continuará marcando el futuro de la cadena alimentaria global, equilibrando seguridad, sostenibilidad y eficiencia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Recomendación y links de Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/para_el_consumidor/ampliacion/colocar_segura.htm https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/home/aecosan_inicio.htm https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/para_el_consumidor/seccion/recomendaciones.htm
2. FAO. <https://www.fao.org/platform-food-loss-waste/es>
3. Tecnología para la conservación alimentaria al menor coste posible: La refrigeración 5.0 es una nueva línea de crecimiento en monitorización de activos, gestión energética, cadena de frío y mantenimiento predictivo. Alimentaria: Revista de tecnología e higiene de los alimentos, ISSN 0300-5755, N° 543, 2023, págs. 12-14
4. Lin H, Xu Y, Guan W, Zhao S, Li X, Zhang C, Blecker C, Liu J. The importance of supercooled stability for food during supercooling preservation: a review of mechanisms, influencing factors, and control methods. Crit Rev Food Sci Nutr. 2024;64(33):12207-12221. doi: 10.1080/10408398.2023.2248515. Epub 2023 Sep 5
5. Archer DL. Freezing: an underutilized food safety technology? Int J Food Microbiol. 2004 Jan 15;90(2):127-38. doi: 10.1016/s0168-1605(03)00215-0. PMID: 14698095.
6. Bonanno L, Bergis H, Gnanou-Besse N, Asséré A, Danan C. Which domestic refrigerator temperatures in Europe? - Focus on shelf-life studies regarding *Listeria monocytogenes* (Lm) in ready-to-eat (RTE) foods. Food Microbiol. 2024 Oct;123:104595. doi: 10.1016/j.fm.2024.104595. Epub 2024 Jul 2. PMID: 39038899.

7. Li Y, Qiao J, Han X, Zhao Z, Kou J, Zhang W, Man S, Ma L. Needs, Challenges and Countermeasures of SARS-CoV-2 Surveillance in Cold-Chain Foods and Packaging to Prevent Possible COVID-19 Resurgence: A Perspective from Advanced Detections. Viruses. 2022 Dec 30;15(1):120. doi: 10.3390/v15010120. PMID: 36680157; PMCID: PMC9864631.
8. Duchenne-Moutien RA, Neetoo H. Climate Change and Emerging Food Safety Issues: A Review. J Food Prot. 2021 Nov 1;84(11):1884-1897. doi: 10.4315/JFP-21-141. PMID: 34185849.

TERMODINÁMICA DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS REFRIGERANTES

David P. Serrano Granados¹

1. Académico Correspondiente RAC. Sección de Físicas y Químicas. IMDEA Energía

Los inicios de la aplicación de la refrigeración por parte de la humanidad se remontan a la Edad Media, e incluso a la Antigüedad, pero su desarrollo a escala industrial y de forma generalizada se produce fundamentalmente durante el siglo XX, basándose en los conceptos sobre enfriamiento y licuefacción de gases y el diseño de las primeras máquinas frigoríficas de siglos anteriores (contribuciones de Robert Boyle, Michael Faraday, Jacob Perkins, Charles Tellier o Carl von Linde, entre otros).

En la actualidad la tecnología de la refrigeración representa uno de los avances clave de las sociedades modernas, estando directamente vinculada a la calidad de vida y el bienestar de las personas. La refrigeración es esencial en sectores tan relevantes como las industrias alimentaria y farmacéutica, la producción de gases licuados, la fabricación de hielo, el acondicionamiento del aire en el sector residencial y también en el transporte de mercancías y personas. La disponibilidad, a precios asequibles, de sistemas de refrigeración y aire acondicionado ha impulsado en las últimas décadas el desarrollo de países y regiones que, de forma permanente o estacional, están sometidos a temperaturas del ambiente muy elevadas, como es el caso de una gran parte de España.



La así denominada producción de frío es en realidad un proceso que implica la extracción de calor de un sistema, lo que conlleva la transmisión de ese calor desde el foco frío hacia el foco caliente. Aparentemente, este fenómeno entraría en contradicción con el Segundo Principio de la Termodinámica que establece que, en relación con el flujo de calor, éste siempre se produce espontáneamente desde el foco caliente al foco frío. En realidad, dicha contradicción no es tal, ya que los sistemas de refrigeración operan con un aporte externo de energía en forma de trabajo o de calor, es decir, conllevan un consumo energético más o menos importante en función de su eficiencia. Este aporte de energía representa la “penalización a pagar” para conseguir que el flujo global de calor en un sistema de refrigeración se transmita del foco frío al foco caliente.

Los efectos del cambio climático están incrementando las temperaturas en muchas regiones del planeta, produciéndose cada vez con más frecuencia episodios con una duración prolongada de altas temperaturas. Paradójicamente, esto conlleva un incremento en las necesidades de refrigeración y, por tanto, un aumento del consumo de energía asociado, incidiendo negativamente en las emisiones de gases de efecto invernadero. Para romper este círculo vicioso resulta fundamental el desarrollo de sistemas de refrigeración de alta eficiencia energética y que se alimenten preferentemente de energías renovables.

La mayor parte de los sistemas de refrigeración operan de acuerdo a un ciclo termodinámico que permite extraer calor de un espacio o sustancia y transferirlo a otro, de mayor temperatura, produciendo así el enfriamiento deseado. El funcionamiento del ciclo termodinámico se basa en la utilización de un fluido refrigerante (también denominado fluido frigorígeno) que absorbe calor en un punto del sistema (foco frío) y lo libera en otro (foco caliente). La operación en ciclo hace posible que no haya pérdidas de refrigerante y que éste se pueda reutilizar de forma continua.

Existe una gran diversidad de sistemas de refrigeración, siendo los más habituales los ciclos de compresión de vapor. Entre ellos, el ciclo de Carnot es uno de los más sencillos y que opera de forma ideal, implicando las siguientes cuatro etapas, durante las que el fluido frigorífico experimenta una serie de transformaciones que afectan a su presión, temperatura y estado físico, además de a otras propiedades como volumen específico, entalpía y entropía:

1. Compresión adiabática. Mediante el trabajo aportado por el compresor el fluido refrigerante, que se encuentra mayoritariamente en forma de vapor saturado, aumenta su presión y temperatura, pasando completamente a estado vapor.
2. Condensación isotérmica. Al pasar por el condensador el refrigerante en estado vapor cede parte de su energía en forma de calor al foco caliente, lo que provoca su paso a líquido saturado (líquido a su temperatura de condensación).
3. Expansión adiabática. El fluido refrigerante condensado se expande al atravesar una válvula lo que produce un descenso de su presión y también de su temperatura. De esta forma, el fluido se encuentra como mezcla líquido-vapor a la salida de la válvula.
4. Evaporación. El fluido refrigerante pasa de nuevo casi en su totalidad a estado vapor en el evaporador al recibir el calor procedente del espacio refrigerado (foco frío). Este proceso de cambio de estado tiene lugar a presión y temperatura constante.

El efecto global que se consigue en este ciclo es la extracción de calor del foco frío (etapa 4) y su trasvase al foco caliente (etapa 2), lo que requiere del aporte de energía en forma de trabajo (etapa 1), mientras que la etapa 3 permite reajustar las condiciones del fluido refrigerante en cuanto a presión, temperatura y estado físico previo a su alimentación al evaporador.

Aunque no es una unidad del Sistema Internacional de Unidades, es habitual utilizar en climatización la frigoría como unidad de medida que indica la capacidad de un sistema de aire acondicionado para extraer calor. Se define como equivalente a la cantidad de energía necesaria para reducir la temperatura de un kg de agua en un grado Celsius, lo que podría considerarse equivalente a una kilocaloría negativa.

La eficiencia energética del ciclo de refrigeración se suele cuantificar a través del denominado coeficiente de rendimiento o de efecto frigorífico del ciclo (COP, de acuerdo a las siglas en inglés de “coefficient of performance”), el cual se define como el cociente entre el calor extraído del foco frío y el trabajo aplicado al fluido en el compresor. El ciclo de Carnot es el de mayor eficiencia energética, la cual solo depende de la diferencia de temperaturas entre los dos focos. Existen numerosas variantes del ciclo de Car-

not que suelen considerar situaciones no ideales y el desarrollo de procesos irreversibles, presentando en consecuencia valores inferiores de COP y, por tanto, menores eficiencias.

Los ciclos de refrigeración para climatización se integran con frecuencia en las denominadas bombas de calor, que pueden operar de forma reversible, permitiendo la calefacción o el enfriamiento de un espacio en función de la época del año. Cuando el intercambio de calor se realiza con el aire exterior la tecnología recibe el nombre de aerotermia y, si se realiza con el subsuelo, se denominan bombas de calor geotérmicas.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que, en aplicaciones de aire acondicionado, además de la temperatura, la humedad del aire suministrado al espacio cerrado es también una variable a controlar para conseguir un grado de confort y bienestar adecuados, lo que implica introducir conceptos de higrometría en el diseño del sistema de refrigeración.

Además de los sistemas de refrigeración por compresión, existe una amplia variedad de alternativas de producción de frío como las indicadas a continuación:

- Refrigeración por absorción. Los vapores del fluido refrigerante son absorbidos por un absorbente líquido (habitualmente se trata de los sistemas agua+amoníaco o agua+bromuro de litio), lo que disminuye apreciablemente el trabajo de compresión posterior.
- Refrigeración termoeléctrica, basada en el efecto Peltier para transferir calor entre dos uniones de materiales.
- Refrigeración por cambio de estado físico como es el caso de la refrigeración evaporativa (la evaporación de agua permite enfriar tanto el agua líquida remanente como el aire en contacto).
- Refrigeración por expansión adiabática (efecto Joule-Thomson), que se aplica en el enfriamiento criogénico del aire, produciéndose al mismo tiempo su separación en nitrógeno y oxígeno líquidos mediante el ciclo Hampson-Linde.

Cuando se requiere alcanzar valores de temperatura muy bajos en el foco frío, el sistema más utilizado es el de una cascada de ciclos en serie, que combinan etapas de compresión de gas y de expansión adiabá-

tica, de forma que el calor se transmite de un ciclo a otro mediante un intercambiador. En este esquema, se trabaja con un fluido refrigerante distinto en cada ciclo, seleccionado de forma que sus propiedades termodinámicas sean las más adecuadas para las correspondientes condiciones de operación. Este sistema, se utiliza, por ejemplo en la licuefacción de gases como el hidrógeno o el helio, que presentan temperaturas de condensación extremadamente bajas (20,3 K y 4,2 K, respectivamente), que resultarían inalcanzables con sistemas de un solo ciclo.

Finalmente, resulta de gran interés destacar las tecnologías de producción de frío solar en las que el aporte energético del ciclo procede de la radiación solar, utilizando bien la electricidad generada por instalaciones fotovoltaicas (sistemas de refrigeración por compresión) o la energía solar térmica (sistemas de refrigeración por absorción). Además de su reducido impacto ambiental, estos sistemas presentan la ventaja de que las mayores necesidades de refrigeración se producen en las épocas del año en las que también hay una mayor irradiación solar.

El fluido refrigerante es una sustancia que cambia de fase fácilmente de líquido a gas y viceversa, lo que le permite absorber y liberar calor de manera eficiente. La selección de un refrigerante adecuado para un sistema de refrigeración requiere considerar cuidadosamente sus propiedades para asegurar su buen funcionamiento. A continuación se destacan las más relevantes:

- Presión de vapor. Representa la presión que alcanzaría el refrigerante en un recinto cerrado, la cual depende directamente de su volatilidad y de la temperatura. Una presión de vapor demasiado baja puede causar problemas de vacío mientras que una presión demasiado alta implicaría la utilización de materiales y componentes especiales, con el consiguiente incremento del coste, además de mayores riesgos de seguridad.
- Viscosidad. Es una propiedad que determina la resistencia al flujo del refrigerante y que depende tanto del estado físico como de la temperatura. Interesa que el fluido refrigerante posea una baja viscosidad con objeto de minimizar las pérdidas de presión y de energía mecánica por rozamiento al circular por las tuberías y equipos de la máquina frigorífica.
- Conductividad térmica. Esta propiedad se encuentra relacionada con la capacidad del refrige-



rante para conducir el calor. Por tanto, una elevada conductividad térmica puede mejorar la transmisión de calor en el sistema.

- Temperatura de ebullición/condensación. Depende de la presión a la que se encuentra el fluido refrigerante, siendo tanto más elevada cuanto mayor es la presión. Estas temperaturas deben tener valores acordes con las condiciones de operación del sistema de refrigeración, concretamente respecto de las requeridas en las etapas de evaporación y condensación del ciclo.
- Temperatura de congelación. Debe de ser lo suficientemente baja como para evitar problemas de taponamiento de conducciones y/o equipos por congelación del refrigerante.
- Calor latente de vaporización/condensación. Es la cantidad de calor, expresada por unidad de masa, que el refrigerante absorbe al pasar de líquido a vapor o que libera cuando se produce el cambio inverso, es decir, de vapor a líquido. Un alto valor del calor latente de vaporización/condensación es una propiedad deseable puesto que minimiza la cantidad de refrigerante a utilizar en el ciclo, disminuyendo el tamaño de los equipos.
- Volumen específico. Se define como el volumen ocupado por unidad de masa de refrigerante. En estado vapor, un bajo volumen específico implica una reducción del tamaño de los componentes del sistema, como es el caso del compresor.
- Estabilidad química y corrosividad. Una elevada estabilidad química y una baja corrosividad del fluido refrigerante son propiedades deseables para asegurar la durabilidad del sistema de refrigeración.
- Inflamabilidad y toxicidad. Son propiedades también importantes al estar relacionadas con la seguridad durante la operación de las máquinas frigoríficas.
- Potencial de contribución al efecto invernadero si se produce la liberación del refrigerante a la atmósfera. Como se recoge en el artículo introductorio de esta serie, la minimización del impacto ambiental de los refrigerantes ha sido un factor clave que ha determinado en gran medida la evolución producida durante las últimas décadas en cuanto a los tipos de refrigerantes utilizados a escala comercial.

La importancia de estas últimas propiedades queda reflejada por las diferentes normativas, tanto a escala nacional como europea, que se han aprobado clasificando a los refrigerantes en diferentes grupos en función de su toxicidad, inflamabilidad y potencial de calentamiento atmosférico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aroca Lastra, S.; Mayoral Esteban, A. (2004). Tecnología frigorífica. Ed. UNED, Madrid. ISBN 978-84-36250-50-3.
2. Gonzalez Sierra, C (2019). Refrigeración Industrial (2ª Edición). Ed. Cano Pina, Murcia. ISBN 978-84-17119-88-1.
3. Moran, M.J.; Shapito, H.N. (2015). Fundamentos de termodinámica Técnica. Ed. Reverté, Barcelona. ISBN 978-84-29143-79-9.
4. Sánchez Pineda, M.T. (2001). Ingeniería del frío: teoría y práctica. Ed. AMV Ediciones, Madrid. ISBN 978-84-89922-33-4.
5. Torella Alcaraz, E. (2010). Frío industrial: métodos de producción. Ed. AMV Ediciones, Madrid. ISBN 978-84-96709-33-1.

SÍNTESIS DE MOLÉCULAS UTILIZADAS COMO REFRIGERANTES. HERRAMIENTAS ACTUALES PARA SELECCIONAR MOLÉCULAS CANDIDATAS A REFRIGERANTES

Carmen Nájera Domingo¹

1. Académica Numeraria de la RAC. Sección de Físicas y Químicas

Los refrigerantes actuales se clasifican como naturales y sintéticos. Los naturales como el dióxido de carbono, el agua, el aire y los hidrocarburos (HCs) como el metano, etano, propano, butano isobuteno, etileno y propileno se encuentran en la naturaleza, estos últimos en el gas natural y en el petróleo. En el caso del

amoniaco se considera como un refrigerante natural aunque se obtiene a nivel industrial a partir de nitrógeno e hidrógeno mediante el proceso Haber-Bosch (Bantillo et al. 2024).

Respecto a los refrigerantes sintéticos, la primera generación la constituyen los clorofluorocarbonos (CFCs) altamente dañinos para la capa de ozono, la segunda generación la forman los hidroclorofluorocarbonos (HCFCs) que, aunque en menor medida, también disminuyen la capa de ozono. La tercera generación corresponde a los hidrofluorocarbonos (HFCs) que aunque no dañan la capa de ozono tiene un alto potencial de calentamiento global (PCG). Dentro de estos HFCs se encuentran las hidrofluoroolefinas (HFOs) el 2,3,3,3-tetrafluoropropano ($\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$, R-1234yf) y el *trans*-1,3,3,3-tetrafluoroprop-1-eno ($\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHF}$, R-1234ze) que tiene bajo PCG y no disminuyen la capa de ozono (Zhang y Li, 2024). Estos HFOs se preparan utilizando varios pasos de reacción normalmente por fluoración de derivados clorados a muy altas temperaturas (Sicard y Baker 2020).

La cuarta generación de refrigerantes la constituyen los hidrofluoroéteres (HFEs) como el trifluorometil difluorometil éter (CF_3OCHF_2 , HFE-125), difluorometil éter ($\text{F}_2\text{CHOCHF}_2$, HFE-134), trifluorometil metil éter (CF_3OCH_3 , HFE-143a), pentafluoroetil metil éter ($\text{F}_3\text{CF}_2\text{COCH}_3$, HFE-245mc), tetrafluoroetil metil éter ($\text{F}_2\text{CHCF}_2\text{OCH}_3$, HFE-254pc), 2,2,2-trifluoroetil éter ($\text{F}_3\text{CCH}_2\text{OCH}_2\text{CF}_3$, HFE-356mff), hexafluoroisopropil metil éter [$(\text{F}_3\text{C})_2\text{CHOCH}_3$, HFE-356mmz]. Esta familia de HFEs tiene bajo PCG y no disminuyen la capa de ozono (Tsai, 2005). Concretamente, el último HFE-356mmz, exhibe no disminución de la capa de ozono y una vida media corta en la atmósfera (62 días), muy bajo PCG (6), baja inflamabilidad, alta estabilidad química y baja toxicidad. Recientemente se ha descrito una síntesis eficiente de este compuesto a partir de hexafluoroisopropanol y carbonato de dimetilo utilizando fluoruro de magnesio como catalizador, en fase vapor y sin utilizar disolventes, sin sustancias contaminantes y en un reactor de flujo continuo (Li, 2020).

Sin embargo, los refrigerantes naturales tienen la ventaja de que no contienen ni cloro ni flúor por lo que siguen siendo una buena alternativa a los hidrofluorocarbonos. Estos HFCs así como los HFEs cuando descomponen en la atmósfera liberan ácido fluorhídrico y otros productos de degradación y todavía no se han hecho estudios suficientemente amplios y fiables sobre su estabilidad térmica, sus productos de

degradación persistentes, toxicidad e inflamabilidad (Zhang y Li, 2024).

A la hora de seleccionar un refrigerante se han de considerar fundamentalmente los siguientes aspectos: capacidad calorífica, inflamabilidad, explosividad, estabilidad y efectos medioambientales como su descomposición, disminución de la capa de ozono (ODP, ozone depletion) y calentamiento global (GWP, global warming power). También, un alto coeficiente de eficiencia (COP) es una medida de una mayor eficiencia energética durante el enfriamiento y el calentamiento. Una combinación de propano, butano e isobutano ha sido creada para producir HC refrigerantes (Bantillo et al. 2024). La proporción de estos hidrocarburos determina la capacidad calorífica, es decir la cantidad de calor que puede absorber y transferir un refrigerante cuando se utiliza en un sistema de bombeo. Los impactos medioambientales son extremadamente importantes y los valores de ODP y GWP han de ser próximos a cero. Los valores de ODP de los refrigerantes naturales, CFCs y HCFCs son típicamente menor de 1. En el caso de los valores de GWP, CFCs, HCFCs y HFCs tiene valores muy altos que HFOs (<0-12) mientras que los refrigerantes naturales tienen un GWP prácticamente nulo. Por tanto, los refrigerantes naturales siguen siendo la mejor opción desde el punto de vista medioambiental.

Respecto a las medidas de seguridad, tanto los hidrocarburos como el amoniaco son altamente inflamables y el amoniaco es tóxico. El dióxido de carbono necesita presión operacional muy alta. Por último, el agua es el refrigerante más seguro pero solamente se puede usar para temperaturas altas y su refrigeración requiere compresores de alta capacidad.

En conclusión, dióxido de carbono, amoniaco y los hidrocarburos son los refrigerantes más prometedores. Los problemas asociados con estos refrigerantes requieren que las industrias desarrollen procesos más seguros, fiables y efectivos y que estén en línea con las regulaciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bantillo, S. M. R.; Callejo, G. A. C.; Camacho, S. M. K. G.; Montalban, M. A.; Valderin, R. E.; Rubi, R. V. (2024). Future Trends of Natural Refrigerants: Selection, Preparation, and Evaluation. Engineering Proceedings, 67, 9.



2. Li, W., Yang, G., Lu, F.; Zhang, X. (2020). A novel vapor-phase catalytic synthetic approach for industrial production of 1,1,1,3,3,3-hexafluoroisopropyl methyl ether. *Applied Catalysis A: General*, 594, 117416.
3. Sicard, A. J.; Baker, R. T. (2020). Fluorocarbon refrigerants and their syntheses. *Chemical Reviews* 120, 9164-9303.
4. Zhang, X.; Li, Y. (2024). A review of recent research on hydrofluoroolefin (HFO) and hydrochlorofluoroolefin (HCFO) refrigerants. *Energy*, 311,133423.

HISTORIA DE LOS DESCUBRIMIENTOS QUE PERMITIERON DEMOSTRAR QUE EL DESCENSO DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO EN LA ESTRATOSFERA ERA CAUSADO POR LOS CFC

Alfonso Saiz López¹

1. Académico Correspondiente de la RAC. Sección de Físicas y Químicas

La capa de ozono, una delgada franja de gas situada en la estratosfera terrestre, desempeña un papel crucial en la protección de la vida en la Tierra al absorber la mayor parte de la radiación ultravioleta (UV) nociva del Sol. A finales del siglo XX, un conjunto de descubrimientos científicos reveló que esta capa de ozono estaba siendo peligrosamente degradada por una serie de compuestos químicos de origen antropogénico, los clorofluorocarbonos (CFCs). Este descubrimiento no solo potenció el estudio de la química y física atmosférica, sino que también impulsó uno de los acuerdos ambientales más importantes de la historia, el Protocolo de Montreal.

Los CFCs fueron desarrollados en la década de 1920 como una alternativa segura a los refrigerantes tóxicos e inflamables como el amoníaco y el dióxido de azufre. Eran compuestos estables, no tóxicos, no inflamables y fáciles de producir. Su uso se expandió rápidamente en refrigeradores, aires acondicionados, espumas aislantes y aerosoles. Durante décadas, los CFCs fueron considerados un avance tecnológico sin

consecuencias negativas aparentes. Sin embargo, su estabilidad química, que los hacía tan útiles en la industria, también les permitía alcanzar la estratosfera sin descomponerse, donde podían interactuar con el ozono.

En los años 70, el científico británico James Lovelock detectó por primera vez la presencia de CFCs en la atmósfera incluso en zonas remotas como la Antártida (Reimann et al., 2018). Aunque Lovelock no consideró inicialmente que estos compuestos fueran peligrosos, su trabajo fue clave para que otros científicos comenzaran a investigar sus efectos.

El gran avance llegó en 1974, cuando Mario J. Molina y F. Sherwood Rowland, de la Universidad de California en Irvine, publicaron un artículo en la revista *Nature* en el que proponían que los CFCs podían destruir el ozono estratosférico (Molina and Rowland, 1974). Su hipótesis se basaba en la fotodisociación. Al llegar a la estratosfera, los CFCs eran fotolizados por la radiación UV, liberando átomos de cloro. Estos átomos actuaban como catalizadores en la destrucción del ozono, iniciando una reacción en cadena en la que un solo átomo de cloro podría destruir hasta 100,000 moléculas de ozono.

Como suele suceder en estos casos, la comunidad científica recibió la hipótesis con bastante escepticismo. Se consideraba que la atmósfera era demasiado grande para que los CFCs tuvieran un impacto significativo. Sin embargo, Molina y Rowland insistieron en la urgencia e importancia del problema y comenzaron a alertar a la opinión pública y a los gobiernos.

En 1985, un equipo de científicos británicos del British Antarctic Survey, liderado por Joseph Farman, publicó un estudio que mostraba una alarmante disminución de los niveles de ozono sobre la Antártida durante la primavera austral (Farman et al., 1985). Este fenómeno, que se denominó como el "agujero de ozono", confirmó las predicciones de Molina y Rowland. El descubrimiento fue tan impactante que inicialmente se pensó que era un error instrumental. Sin embargo, los datos satelitales de la NASA, que hasta entonces habían sido descartados por considerarse anómalos, confirmaron la existencia del agujero de ozono. La comunidad científica se movilizó rápidamente para intentar comprender el fenómeno.

El agujero de ozono antártico se explica por una combinación de factores únicos. Durante el invierno austral, en ausencia de luz solar, se forman nubes es-

tratosféricas polares (PSC) que proporcionan una superficie para reacciones químicas heterogéneas que convierten compuestos de cloro inactivos en formas reactivas, y que eliminan compuestos de nitrógeno que podrían desactivar el cloro reactivo. Cuando regresa la luz solar en la primavera, estas formas reactivas de cloro destruyen rápidamente el ozono. Este mecanismo fue confirmado por observaciones en campo, como las realizadas por Susan Solomon y su equipo en la Antártida a finales de los años 80 (Solomon et al., 1987). Sus mediciones demostraron que los niveles de cloro reactivo eran extremadamente altos en la región del agujero de ozono.

Ante la abrumadora evidencia científica y la presión pública, la comunidad internacional comenzó a actuar con rapidez. En 1987 se firmó el Protocolo de Montreal, un acuerdo global para reducir y eliminar la producción de sustancias que destruyen la capa de ozono, incluidos los CFCs. El tratado ha sido revisado y actualizado en múltiples ocasiones, consolidándose como uno de los mayores éxitos de la diplomacia ambiental a escala global.

Gracias a este acuerdo, las concentraciones de CFCs en la atmósfera han disminuido, y la capa de ozono muestra signos de recuperación (WMO, 2022). Se espera que, si se mantienen las políticas actuales, el agujero de ozono se cierre completamente hacia mediados del siglo XXI.

En 1995, Mario Molina, Sherwood Rowland y Paul Crutzen recibieron el Premio Nobel de Química por su trabajo pionero en la química atmosférica y el descubrimiento del impacto de los CFCs sobre la capa de ozono. Crutzen había sido además uno de los primeros en estudiar los efectos de los óxidos de nitrógeno en el ozono, lo que sentó las bases para la investigación posterior.

El caso de los CFCs y la capa de ozono es un ejemplo claro de cómo la ciencia puede identificar un problema, en este caso un problema global, y de cómo la cooperación internacional puede conducir a soluciones efectivas. También nos muestra la importancia de la vigilancia ambiental, la investigación básica y la comunicación entre científicos, políticos y el público en general.

Este episodio, además, ha servido como modelo para abordar las posibles soluciones a otros desafíos ambientales, como es el caso del cambio climático. Si bien los gases de efecto invernadero no han sido re-

gulados con la misma eficacia que los CFCs, el éxito del Protocolo de Montreal demuestra que es posible actuar a escala global cuando existe voluntad política y consenso científico.

La historia del descubrimiento del vínculo entre los CFCs y la destrucción de la capa de ozono es una historia de ciencia, perseverancia y cooperación internacional. Desde las primeras mediciones de Lovelock y la hipótesis de Molina y Rowland, hasta la confirmación empírica del agujero antártico y la respuesta internacional, este proceso ha sido un hito en la historia de la química atmosférica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Farman, J. C., Gardiner, B. G., and Shanklin, J. D.: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature*, 315, 207–210, <https://doi.org/10.1038/315207a0>, 1985.
2. Molina, M. J. and Rowland, F. S.: Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone, *Nature*, 249, 810–812, <https://doi.org/10.1038/249810a0>, 1974.
3. Reimann, S., Elkins, J. W., Fraser, P. J., Hall, B. D., Kurylo, M. J., Mahieu, E., Montzka, S. A., Prinn, R. G., Rigby, M., Simmonds, P. G., and Weiss, R. F.: Observing the atmospheric evolution of ozone-depleting substances, *Comptes Rendus Geoscience*, 350, 384–392, <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.08.008>, 2018.
4. Solomon, S., Mount, G. H., Sanders, R. W., and Schmeltekopf, A. L.: Visible spectroscopy at McMurdo Station, Antarctica: 2. Observations of OCIO, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92, 8329–8338, <https://doi.org/10.1029/JD092iD07p08329>, 1987.
5. WMO: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No. 278, 509 pp., World Meteorological Organization: Geneva, 2022.