



**Academia de Ciencias Matemáticas,
Físico-Químicas y Naturales de Granada**

**CAMBIO CLIMÁTICO, GASES DE EFECTO INVERNADERO Y
QUÉ HACER CON ELLOS**

DISCURSO PARA EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICA CORRESPONDIENTE POR LA

ILMA. SRA. DÑA. LOURDES VEGA FERNÁNDEZ

GRANADA, 2017



**Academia de Ciencias Matemáticas,
Físico-Químicas y Naturales de Granada**

**CAMBIO CLIMÁTICO, GASES DE EFECTO INVERNADERO Y
QUÉ HACER CON ELLOS**

DISCURSO PARA EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICA CORRESPONDIENTE POR LA

ILMA. SRA. DÑA. LOURDES VEGA FERNÁNDEZ

GRANADA, 2017

Dijo el zorro al Principito:

“El tiempo que perdiste por tu rosa hace que tu rosa sea tan importante”

El Principito, Antoine de Saint-Exupéry

La ciencia se convierte en pasión cuando aquello en lo que trabajamos tiene una aplicación directa y positiva en lo que nos rodea y en la sociedad.

Dedicado a:

Mis padres, mis hermanos, mi familia, mis mentores, colaboradores y todos aquellos, que, de una manera u otra han influido en mi vida y me han enseñado a mirar siempre hacia adelante sin olvidar de dónde vengo.

Dedicado a:

Marie Curie, extraordinario modelo de científica, madre, hermana y esposa, grande entre los grandes.

Dedicado a:

Jordi, Anna, Marta y David, sin los cuales no puedo entender mi vida, mi trabajo y mi ser.

CAMBIO CLIMÁTICO, GASES DE EFECTO INVERNADERO Y QUÉ HACER CON ELLOS

LOURDES VEGA FERNÁNDEZ

Excelentísimo Sr. Presidente,

Excelentísimos e Ilustrísimos Sres. Académicos,

Señoras y Señores:

Antecedentes

Cuentan que, en una rueda de prensa, un periodista preguntó a Einstein: "¿Me puede usted explicar la Relatividad?"; a lo que Einstein respondió: "¿Me puede usted explicar cómo se fríe un huevo?". El periodista, extrañado por la respuesta, afirmó: "Pues sí, sí puedo." Entonces Einstein replicó: "Bueno, pues hágalo, pero imaginando que yo no sé qué es un huevo, ni una sartén, ni el aceite, ni el fuego".

Trasladándolo al tema que nos ocupa, la pregunta podría ser: "¿Puede usted explicarme cómo combatir el cambio climático y el calentamiento global desde la ciencia?".

Para ello deberíamos saber primero qué se entiende por desarrollo sostenible, cambio climático, calentamiento global, y gases de efecto invernadero, por qué se culpa, sobre todo en los medios de comunicación, al dióxido de carbono, o CO₂, del cambio climático (lo cual no es del todo correcto), qué es el CO₂ y cuáles son sus propiedades, qué otros gases y procesos afectan negativamente al medio ambiente, cómo funcionan esos procesos, qué medidas se están tomando desde el marco regulador para frenar el cambio climático, y cómo la ciencia, y en concreto la físico-química, puede ayudar a identificar los problemas y desarrollar soluciones sostenibles para mitigar esos efectos a corto, medio y largo plazo.

Sobre esto versa mi discurso de hoy.

Según el diccionario de la Real Academia Española, sostenible es un adjetivo que indica “que se puede sostener; especialmente en ecología y economía, que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente.” El concepto de desarrollo sostenible fue descrito por primera vez en 1987, en el informe de la Comisión de Brundtland,¹ como un “desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades”. Existen cuatro dimensiones del desarrollo sostenible: la sociedad, el medio ambiente, la cultura y la economía, todas ellas interconectadas. Este concepto se aplica a una forma de desarrollo socioeconómico más humano que el que venía desarrollándose tradicionalmente, y está muy relacionado con la preservación del medioambiente².

¹ Su definición se formalizó por primera vez en el documento conocido como el Informe Brundtland de 1987, denominado así por la primera ministra noruega Gro Harlem Brundtland, fruto de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas, creada durante la Asamblea de las Naciones Unidas en 1983. Dicha definición se asumió en el Principio 3º de la Declaración de Río (1992) aprobada en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. https://es.wikipedia.org/wiki/Desarrollo_sostenible

² En ecología, el termino sostenibilidad o sustentabilidad describe cómo los sistemas biológicos se mantienen diversos, materiales y productivos con el transcurso del tiempo. Se refiere al equilibrio de una

Por su parte, el cambio climático se define,³ en términos generales, como un cambio significativo y perdurable de la distribución estadística de los patrones climáticos (emisión de radiaciones solares, composición de la atmósfera, disposición de los continentes y corrientes marinas),⁴ principalmente su promedio y dispersión, durante períodos de tiempo que abarcan desde décadas a millones de años, independientemente de su causa. A su vez, el calentamiento global responde a un aumento, inequívoco y continuo, de la temperatura media del sistema climático de la Tierra.

La Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define al cambio climático en su artículo 1 párrafo segundo, como “un cambio de clima atribuido, directa e indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempos comparables.”⁵ Así pues, en la mayoría de los casos, cuando hablamos de cambio climático hoy en día nos estamos refiriendo a aquél provocado, fundamentalmente, por la actividad humana, también llamado cambio climático antropogénico.

Un gas de efecto invernadero (GEI) es un gas atmosférico que absorbe y emite radiación dentro del rango infrarrojo. Este proceso es la causa fundamental del efecto invernadero, proceso en el que la radiación térmica emitida por la superficie planetaria es absorbida por dichos gases y re-irradiada en todas las direcciones. Parte de esta radiación es devuelta hacia la superficie y la atmósfera inferior, resultando en un incremento de la

especie con los recursos de su entorno. Por extensión se aplica a la explotación de un recurso por debajo del límite de renovación del mismo.

³ “Glossary – Climate Change”. Education Center – Arctic Climatology and Meteorology. NSIDC National Snow and Ice Data Center.; Glossary, en IPCC TAR WG1, 2001.

⁴ Cambios en dichos patrones y en la órbita de la Tierra pueden modificar la distribución de energía y el equilibrio térmico, alterando así profundamente el clima cuando se trata de procesos de larga duración.

⁵ Naciones Unidas. “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, 1992. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>. Consultado el 5 de mayo de 2017.

temperatura superficial media respecto a la que habría en ausencia de los gases de efecto invernadero. Sin la presencia de estos gases en la atmósfera la temperatura promedio de la superficie terrestre sería alrededor de -18°C , en lugar de la media actual de 15°C .⁶ Por tanto, la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera es absolutamente imprescindible para la vida en el planeta.

Los principales gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera terrestre son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido de nitrógeno y el ozono, mientras que los gases de efecto invernadero especialmente responsables del calentamiento global son, de entre los gases atmosféricos, el dióxido de carbono, el gas metano, el óxido nitroso, y tres gases industriales fluorados: los hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre, todos ellos contemplados en el Protocolo de Kioto⁷ como gases de los que deben reducirse sustancialmente sus emisiones.

Pero no todos los gases de efecto invernadero tienen el mismo efecto. El potencial de calentamiento atmosférico, PCA o GWP (acrónimo del inglés *Global Warming Potential*) es una medida relativa de cuánto calor puede ser atrapado por un determinado gas de efecto invernadero⁸ en comparación con un gas de referencia, por lo general dióxido de carbono. Por ejemplo, el PCA

⁶ "NASA GISS: Science Briefs: Greenhouse Gases: Refining the Role of Carbon Dioxide". www.giss.nasa.gov. Consultado el 2 de agosto de 2017.

⁷ El Protocolo de Kioto es un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y un acuerdo internacional cuyo objetivo es reducir las emisiones de los seis gases de efecto invernadero que contribuyen en mayor medida al calentamiento global: dióxido de carbono, gas metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre, en un porcentaje aproximado de al menos un 5 %, dentro del periodo que va de 2008 a 2012, en comparación a las emisiones a 1990. El texto íntegro en castellano puede encontrarse en el siguiente enlace: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

⁸ El potencial de calentamiento atmosférico o potencial de calentamiento global depende de los siguientes factores: la absorción de la radiación infrarroja por una determinada especie, la ubicación del espectro de absorción de las longitudes de onda y la vida media en la atmósfera de las especies.

para 100 años⁹ del metano es 25, para N₂O 298 y para el hexafluoruro de azufre 22.800, asignando al CO₂ un potencial de calentamiento atmosférico de 1 para ese mismo periodo de tiempo. En otras palabras, la emisión de un millón de toneladas de metano es equivalente a emitir 25 millones de toneladas de CO₂, mientras que la emisión de un millón de toneladas de SF₆ equivaldría a emitir 22.800 millones de toneladas de CO₂.¹⁰ Por ello se habla de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, o emisiones de CO₂ equivalentes, y no sólo de CO₂.

El cambio climático como tal no es algo reciente. El clima de la Tierra ha cambiado a lo largo de la historia, tal y como lo demuestran numerosos estudios. Sólo en los últimos 650.000 años se han producido siete ciclos de avance y retroceso de los glaciares, con el fin abrupto de la última era de hielo, conocida popularmente como Edad de hielo, hace aproximadamente 10.000 años, que marcó el comienzo de la era del clima moderno (Holoceno) y de la civilización humana.¹¹ La mayoría de estos cambios climáticos se atribuyen a muy pequeñas variaciones en la órbita de la Tierra que cambian la cantidad de energía solar que recibe nuestro planeta. Estudios llevados a cabo en los núcleos de hielo extraídos de Groenlandia, la Antártida y los glaciares de montañas tropicales muestran que el clima de la Tierra responde también a los cambios en los niveles de gases de efecto invernadero. Asimismo, se pueden encontrar evidencias de lo ocurrido miles de años atrás

⁹ Aunque el potencial de calentamiento atmosférico de los GEI puede calcularse para periodos de 20, 100 o 500 años, el valor usado más frecuentemente es de 100 años, establecido así por el IPCC (acrónimo del inglés *Intergovernmental Panel on Climate Change*).

¹⁰ La mayoría de los gases con un elevado PCA son gases industriales fluorados, debido a su larga vida útil en la atmósfera y su alto potencial de absorción.

¹¹ La Era Cuaternaria o Antropozóica se inició hace un millón de años y se extiende hasta nuestros días. Se divide en dos periodos: el Pleistoceno o Edad de hielo, durante el cual el hielo se extendió en forma de glaciares sobre buena parte de la superficie terrestre (en este periodo surgieron animales como los mamuts y felinos dientes de sable, además de los primeros hominos); y el Holoceno o Edad de la civilización, cuando comenzó el deshielo, lo que hizo subir el nivel del mar, inundando grandes superficies de tierra y ensanchando la plataforma continental. Los seres humanos empezaron a organizarse en grupos sociales que se concentraban en "ciudades". Ver, por ejemplo: <http://www.elpopular.pe/series/escolar/2015-03-13-la-era-cuaternaria-o-antropozoica>

en anillos de árboles, sedimentos oceánicos, arrecifes de coral y capas de rocas sedimentarias. Estos datos revelan que el calentamiento actual está ocurriendo aproximadamente diez veces más rápido que la tasa promedio de calentamiento de la recuperación de la Edad de hielo.¹²

De acuerdo con los análisis mensuales que realiza la NASA¹³ desde el Instituto Goddard para Estudios Espaciales (GISS) en Nueva York, el mes de julio de 2017 igualó estadísticamente al de julio 2016 como el mes de julio más cálido en los 137 años en los que se ha venido monitorizando la temperatura por métodos modernos. Se ha estimado que, si las emisiones de gases de efecto invernadero continuaran al ritmo actual, la temperatura de la superficie terrestre podría exceder los valores históricos hacia el año 2047, con efectos potencialmente dañinos en los ecosistemas y la biodiversidad, y peligrando la subsistencia humana en el planeta. Estimaciones más recientes, de agosto de 2016, sugieren que, de seguir la trayectoria actual de emisiones, la Tierra podría superar el límite de 2°C de calentamiento global, límite señalado por el Panel Internacional para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés, de *International Panel for Climate Change*) como un calentamiento global "peligroso", en 2036 [1].

¿Se está generando con esto una alarma social sin una base científica sólida? La respuesta clara es no. En la actualidad el noventa y siete por ciento de los científicos del clima coinciden en que las tendencias del calentamiento climático desde mediados del siglo XX son muy probablemente debidas a actividades humanas, y la mayoría de las principales organizaciones científicas de todo el mundo han emitido declaraciones públicas que

¹² National Research Council (NRC), 2006. Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years. National Academy Press, Washington, D.C.
<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalWarming/page3.php>

¹³ <https://climate.nasa.gov/>. Consultado el 20 de agosto de 2017.

respaldan esta posición.¹⁴ El IPCC, en el resumen de su quinto informe dirigido a legisladores y publicado en octubre de 2013 [2], afirma: “El calentamiento del sistema climático es inequívoco, y desde la década de los cincuenta, muchos de los cambios observados no tienen precedentes en decenas de miles de años. La atmósfera y los océanos se han calentado, las cantidades de hielo y nieve han disminuido, el nivel del mar ha aumentado, y las concentraciones de los gases de efecto invernadero han aumentado. (...) Es extremadamente probable que la influencia humana sea la causa dominante del calentamiento observado desde la segunda mitad del siglo XX. (...) Emisiones continuadas de gases de efecto invernadero causarán un calentamiento mayor y cambios en todos los componentes del sistema climático. Limitar el cambio climático requerirá reducciones sustanciales y sostenibles de emisiones de gases de efecto invernadero.”¹⁵

La situación es, pues, preocupante y requiere tomar medidas urgentes a nivel global al respecto. Los gobiernos y las instituciones gubernamentales son conscientes de ello, y, desde 1987, se han venido generando una serie de acuerdos y tratados internacionales, vinculantes para los países firmantes. El primero de ellos fue el Protocolo de Montreal¹⁶, centrado en reducir las emisiones de los compuestos clorofluorocarbonados (CFCs), utilizados en diversas aplicaciones industriales, pero altamente dañinos para la capa de

¹⁴ Véase, por ejemplo, <https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/> y las referencias que allí aparecen. Consultada el 2 de agosto de 2017.

¹⁵ En este resumen para legisladores, el término “extremadamente probable” se refiere a 95–100% de probabilidad.

¹⁶ El Protocolo afirma: "Reconociendo que la emisión en todo el mundo de ciertas sustancias puede agotar considerablemente y modificar la capa de ozono en una forma que podría tener repercusiones nocivas sobre la salud y el medio ambiente,... Decididas a proteger la capa de ozono adoptando medidas preventivas para controlar equitativamente el total de emisiones mundiales de las sustancias que la agotan, con el objetivo final de eliminarlas, sobre la base de los adelantos en los conocimientos científicos, teniendo en cuenta aspectos técnicos y económicos y teniendo presentes las necesidades que en materia de desarrollo tienen los países en desarrollo"...

Para ello las partes aceptaron reducir sus niveles de consumo y producción de CFCs según el nivel de desarrollo de sus economías. A los países en vías de desarrollo se les aplicó un nivel básico y un cronograma diferente al de los países desarrollados. Este ha sido uno de los tratados internacionales de protección del medio ambiente que mayor éxito ha tenido a nivel global.

ozono, y, por tanto, influyentes decisivos del calentamiento global. Un paso esencial para tomar otras medidas a nivel global fue la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), adoptada en Nueva York el 9 de mayo de 1992 y que entró en vigor el 21 de marzo de 1994.¹⁷ El objetivo de la CMNUCC es “lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático, y en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurando que la producción de alimentos no se vea amenazada, y permitiendo que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.”

La Convención reconoce que es un documento “marco”, es decir, un texto que debe enmendarse o desarrollarse con el tiempo para que los esfuerzos frente al calentamiento atmosférico y el cambio climático puedan orientarse mejor y ser más eficaces.

La CMNUCC incorporó el Protocolo de Montreal de 1987 antes mencionado, en virtud del cual los estados miembros están obligados a actuar en interés de la seguridad humana incluso a falta de certeza científica. El primer tratado desarrollado desde la CMNUCC fue el Protocolo de Kioto, aprobado en 1997, y que limitaba de manera cuantitativa, y con fechas concretas, las emisiones de los seis gases principalmente causantes del efecto invernadero.¹⁸ Este protocolo estuvo vigente hasta 2012. Desde entonces, de manera periódica se han venido celebrando varias reuniones de la Convención y expertos invitados para definir qué medidas tomar. Así, en diciembre de 2015 tuvo lugar en París la vigésimo primera sesión de la Conferencia de las Partes de la CMNUCC, conocida como COP21. La

¹⁷ En la actualidad la CMNUCC está integrada por 196 países (con la salida de los EEUU en 2017).

¹⁸ El Protocolo de Kioto limita las emisiones de estos gases en un porcentaje aproximado de al menos un 5 %, dentro del periodo que va de 2008 a 2012, en comparación a las emisiones a 1990.

COP21 terminó con la adopción del Acuerdo de París¹⁹ que establece el marco global de lucha contra el cambio climático a partir de 2020. Se trata de un acuerdo histórico de lucha contra el cambio climático, que promueve una transición hacia una economía baja en emisiones y resiliente al cambio climático. El Acuerdo tuvo gran repercusión en los medios de comunicación y en la sociedad, dado el elevado número de países que lo firmaron, y que tiene un carácter jurídicamente vinculante. Muy recientemente, en octubre de 2016 se firmó el Acuerdo de Kigali²⁰, una enmienda al Protocolo de Montreal, centrado en la prohibición de los refrigerantes²¹ actualmente en uso (hidrofluorocarbonos) y la necesidad de sustituirlos por gases con un potencial de calentamiento global mucho menor.

Además de los acuerdos gubernamentales entre estados, es preciso que tanto la ciudadanía en general, como aquellos que puedan hacer algo técnico al respecto para encontrar soluciones, incluidos nosotros los científicos, seamos conscientes y tomemos parte activa en el proceso. En este sentido, un termómetro actual (cualitativo y parcial, pero real) para medir la relevancia o popularidad de un tema es el uso de internet y sus redes sociales. El buscador Google proporciona²² 2.430.000 resultados para el término “cambio climático” (175.000.000 de resultados para “climate change”, en inglés), 372.000 resultados para el binomio “CO₂ y cambio climático” (44.300.000 resultados cuando la búsqueda se realiza en inglés: “CO₂ and climate change”). Por su parte, la búsqueda proporciona, para el binomio

¹⁹ El primer objetivo del Acuerdo de Paris es mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático

²⁰ <https://eia-international.org/wp-content/uploads/EIA-Kigali-Amendment-to-the-Montreal-Protocol-FINAL.pdf>

²¹ Un refrigerante es un fluido utilizado en la transmisión de calor que, en un sistema de refrigeración, absorbe calor a bajas temperatura y presión, cediéndolo a temperatura y presión más elevadas. Este proceso tiene lugar, generalmente, con cambios de fase del fluido.

²² Consultado el 16 de agosto de 2017.

“CO₂ y calentamiento global”, 530.000 resultados (15.900.000 resultados para la búsqueda en inglés de “CO₂ and global warming”) y la de “gases de efecto invernadero” 920.000 resultados (23.800.000 resultados de “greenhouse gases”). Estos números, aunque aproximados, aumentan a diario, revelando, por sí solos, el impacto que este tema está teniendo en la sociedad actualmente.

¿Qué podemos y debemos hacer los científicos para ayudar en este sentido? Hace años que vengo planteándome personalmente esta pregunta, para ver cómo desde la físico-química podemos aportar nuestro granito de arena. La ciencia se convierte en pasión cuando aquello en lo que trabajas tiene una aplicación directa y positiva en lo que te rodea y en la sociedad, y éste es un claro ejemplo, la calidad de vida de las generaciones futuras, el aire que respiramos, el agua que bebemos, los alimentos y la energía que consumimos, están directamente relacionados con la evolución del clima, y, por lo tanto con los avances científicos que pueden llevarse a cabo para preservarlos y mejorarlos – hacer algo al respecto está en nuestras manos. Como veremos en este discurso, gran parte del conocimiento generado sobre el tema, y los consiguientes avances científicos y técnicos, han sido posibles gracias al trabajo de investigación llevado a cabo por numerosos científicos e ingenieros, especialmente físico-químicos, a lo largo de la historia, y aún nos queda mucho trabajo por hacer.

Dr. Jekyll y Mr. Hyde: las dos caras del CO₂

Centrémonos ahora en el dióxido de carbono, por ser el gas de efecto invernadero que en mayor cantidad se emite a la atmósfera, aunque su PCA sea de uno. A temperatura ambiente el dióxido de carbono es un gas inodoro, incoloro, ligeramente ácido y no inflamable. Si se somete a temperaturas inferiores de -79°C , a presión atmosférica solidifica, formando la nieve carbónica, mientras que pasa de la fase líquida o vapor a ser un fluido

supercrítico a la temperatura de 31,1°C y presión de 72,8 atmósferas. Sus propiedades físicas y químicas son las que hacen que en la actualidad pueda ser usado en multitud de procesos industriales, y son precisamente esas características las que potenciarán su uso en aplicaciones futuras. Al ser un compuesto no tóxico, no inflamable y abundante en la naturaleza, se le considera un solvente “verde” (o medioambientalmente benigno) comparado con otros compuestos volátiles orgánicos, con un mayor potencial de calentamiento global, o tóxicos, a los que podría reemplazar en numerosos procesos químicos. Esta es la cara amable del CO₂ (Dr. Jekyll), como veremos un poco más adelante.

La primera persona en aislar el dióxido de carbono en estado puro fue Joseph Black en 1756, lo que supuso un avance importante en la historia de la química, evidenciando que el aire no era un elemento simple, sino que está compuesto por varios elementos diferentes.²³ El CO₂ puede obtenerse a partir de distintos procedimientos. Existen numerosas reacciones químicas que dan como producto CO₂, incluyendo la reacción entre muchos ácidos y la mayoría de los metales. Industrialmente el CO₂ se obtiene absorbiendo, concentrando y purificando el dióxido de carbono contenido en corrientes de gases procedentes de los procesos de fabricación de, por ejemplo, las plantas de producción de hidrógeno, de amoníaco, de óxido de etileno y de bioetanol, en la fermentación de azúcar en bebidas alcohólicas, la manufacturación del fosfato de sodio, etc. Por otra parte, todos los organismos aeróbicos producen CO₂ cuando oxidan carbohidratos, ácidos grasos y proteínas en las mitocondrias de las células. Asimismo, la combustión de los combustibles fósiles (derivados del petróleo, carbón y gas natural) y de la madera, producen CO₂. En estos últimos casos el CO₂ es, en principio, un producto no deseado, que se desecha, emitiéndolo a la atmósfera, aumentando de

²³ https://es.wikipedia.org/wiki/Joseph_Black

manera considerable su concentración en la misma y teniendo una influencia directa en el cambio climático. Esta es la “cara mala” del CO₂, (o Mr. Hyde). Como hemos visto anteriormente, el CO₂ es un gas de efecto invernadero. La capacidad de captura de calor de éste, y otros gases, se demostró a mediados del siglo XIX. En 1859, el físico John Tyndall [3] reconoció el efecto invernadero natural de la Tierra y sugirió que ligeros cambios en la composición atmosférica podrían provocar variaciones climáticas.²⁴ Pocos años después, Svante Arrhenius, en 1896, cuando desarrollaba de una teoría para explicar las edades de hielo, utilizó los principios básicos de la química física para calcular estimaciones de en qué medida el aumento del dióxido de carbono atmosférico aumenta la temperatura de la superficie terrestre a través del efecto invernadero. Estos cálculos le llevaron a concluir que las emisiones de CO₂ causadas por los seres humanos, por combustión de combustibles fósiles y otros procesos de combustión, son lo suficientemente grandes como para causar el calentamiento global.²⁵ Arrhenius llegó a estimar [4], basándose en los niveles de CO₂ de su tiempo, que reduciendo estos niveles por 0.62 – 0.55 se podría disminuir la temperatura en 4–5 °C, y que un aumento de 2.5 a 3 veces la concentración de CO₂ podría llegar a causar un aumento de temperatura de 8–9 °C en el Ártico.²⁶

El dióxido de carbono es un componente natural del aire. Está en la atmósfera en una concentración media de aproximadamente 0,03%. Sin embargo, como hemos visto, la cantidad de CO₂ que hay en la atmósfera ha venido aumentando alarmantemente desde mediados del siglo XX y afectando al cambio climático. Es, como decíamos, la cara mala del CO₂ (Mr. Hyde), y en la actualidad, la más conocida. Y razones no faltan para ello. En mayo de

²⁴ <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wea.386/pdf>

²⁵ Arrhenius, usando la ley de Stefan-Boltzmann formuló su “regla”: “si la cantidad de ácido carbónico [CO₂ + H₂O → H₂CO₃ (ácido carbónico)] aumenta en progresión geométrica, el aumento de la temperatura lo hará aproximadamente en progresión aritmética.”

²⁶ http://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf. Consultado el 15 de julio de 2017.

2013, el observatorio que la Agencia Nacional de Océanos y Atmósfera de los Estados Unidos (NOAA) tiene en Hawái captaba una concentración de 400 partes por millón de dióxido de carbono en el aire (es decir, 0,04%) por primera vez desde que se tienen registros modernos. En los inicios de la Revolución Industrial había 278 ppm de CO₂ en la atmósfera (~0,03%), siendo ésta una concentración que representaba un balance natural entre la atmósfera, los océanos y la biosfera [5]. Pero la creciente quema de combustibles fósiles, y las emisiones de distintos procesos, está alterando considerablemente ese balance. El registro de 2013 fue puntual, localizado y temporal y, en los meses siguientes la cifra disminuyó de nuevo. Sin embargo, en 2015 el planeta en su conjunto (no de manera puntual) superó la medida de las 400 ppm, medida que ha vuelto a superarse en 2016 y 2017, por tres años consecutivos.

Se estima que en el mundo seguiremos produciendo un 80-85% de la energía que consumimos a partir de combustibles fósiles, al menos hasta 2030. Puesto que el uso de combustibles fósiles sigue siendo, y será durante años, imprescindible para el desarrollo económico y la seguridad en el suministro energético, y dicho desarrollo es imparable, es necesario, tal y como recoge el Protocolo de Kioto, llevar a cabo una serie de medidas complementarias, incluyendo, la eficiencia energética, el ahorro energético, el uso de recursos naturales y renovables y la captura, transporte y almacenamiento de CO₂ (conocido como tecnologías CAC) para disminuir de manera drástica esas emisiones.²⁷ De entre ellas, el objetivo de las CACs es separar el CO₂ producido en distintos procesos hasta obtener una corriente de gases con una concentración suficientemente elevada de CO₂ para comprimirlo y transportarlo hasta el lugar donde vaya a ser almacenado de forma definitiva.

²⁷ Muy recientemente el término de captura, transporte y almacenamiento de CO₂ ha pasado a ser captura, transporte, almacenamiento y usos del CO₂, reconociendo así el papel que puede jugar este último en la lucha por el cambio climático.

La etapa más costosa de estas tecnologías, desde el punto de vista energético, y, por tanto, económico, es la de la captura de CO₂ en las fuentes de emisión. A nivel industrial se usa la tecnología de separación por absorción con soluciones acuosas de aminas, y posterior desorción, para producir el CO₂ requerido por el mercado.²⁸ En la actualidad se está intentando adaptar esta tecnología para la captura de CO₂ a gran escala, ya que puede adaptarse fácilmente a las plantas térmicas existentes. Sin embargo, este proceso conlleva una penalización energética de aproximadamente el 30% de la energía producida en la planta, necesaria en el proceso de recuperación del CO₂, lo que refuerza la búsqueda de procesos más eficientes y mejores desde el punto de vista medioambiental, siendo ésta una de las áreas de investigación más activas en la actualidad [6],[7]. El conocimiento detallado de la interacción de las moléculas de CO₂ con los distintos solventes, y con adsorbentes sólidos, es pieza clave para avanzar en la búsqueda de materiales eficientes para la separación selectiva del CO₂ de otros gases.

Ahora bien, ¿es el almacenamiento permanente la única vía para que el CO₂ producido no llegue a la atmósfera? Sabemos que el dióxido de carbono es un compuesto no tóxico, no inflamable y abundante en la naturaleza, y que tiene numerosas aplicaciones. Por tanto, el paradigma de cambio de emisiones pasa también por la búsqueda de nuevas aplicaciones sostenibles del CO₂ que fomenten su uso a gran escala, convirtiéndolo en un recurso, en lugar de lanzarlo como desecho.²⁹

²⁸ Una descripción detallada de las distintas tecnologías de captura, a nivel divulgativo, puede encontrarse en el capítulo 2 del libro "El CO₂ como recurso. De la captura a los usos industriales". Ver bibliografía [5].

²⁹ Aunque en muchos casos se habla de reciclar el CO₂ o de reutilizarlo, este término no es del todo correcto, ya que en la mayoría de los casos no ha sido utilizado, se produce y se emite directamente. Los términos correctos son, pues, uso o utilización del CO₂. Pueden existir unos casos en los que si se re-utilice o re-use (por ejemplo, en un reactor de fluidos supercríticos o en la recuperación mejorada del petróleo si se vuelve a inyectar), pero no son generales.

¿El CO₂ como recurso?

Los datos en cuanto a emisiones y usos actuales del CO₂ son irrefutables: las 32.1 gigatoneladas métricas anuales de CO₂ emitidas a la atmósfera por la acción humana³⁰ son muy superiores a los aproximadamente 200 millones de toneladas métricas de CO₂ usados anualmente por la industria global [8], es decir, la cantidad de CO₂ que se emite hoy en día es más de 150 veces mayor que la cantidad absorbida por la industria global en sus distintas aplicaciones. Con las tecnologías y usos actuales del CO₂, es evidente que su captura y almacenamiento permanente serán necesarios independientemente de la cantidad que la industria termine usando como materia prima o para distintas aplicaciones, al menos a corto y medio plazo. Sin embargo, el desarrollo sostenible antes mencionado plantea la investigación de alternativas al almacenamiento, viables a largo plazo, no como solución única al problema de evitar las emisiones de gases de efecto invernadero, sino como posibilidad alternativa complementaria a ese almacenamiento y a las otras medidas a adoptar. Es mucho más atractivo, a pesar de las actuales limitaciones técnicas y de tamaño de mercado, pensar en el uso de ese CO₂ capturado para nuevas aplicaciones industriales, que en su almacenamiento como única opción. El aumento del precio del petróleo y el reconocimiento cada vez mayor de la necesidad de reducir el impacto de la industria en el cambio climático han llevado a un interés creciente en el uso de fuentes alternativas de energía y de compuestos para la industria química. Esta estrategia incluye, entre otras, la utilización industrial del CO₂ y la fijación del CO₂ en biomasa.

El desarrollo de las aplicaciones del CO₂ va intrínsecamente unido al conocimiento que científicos e ingenieros han ido desarrollando sobre él a lo largo de la historia. La recuperación y utilización química del dióxido de

³⁰ Datos de la Agencia Internacional de la Energía referidos a 2016.

carbono es una tecnología conocida desde la segunda mitad del siglo XIX [8]: entre los años 1869 y 1922 se desarrollaron tres procesos industriales que involucran de manera directa al CO₂: la síntesis de ácido salicílico a partir de sales de fenol (Na y K) y CO₂, descubierto en 1869 por Kolbe [9], la síntesis de NaHCO₃-Na₂CO₃ desarrollada en 1882 por Solvay [10], y la conversión de amoníaco y CO₂ en urea, lograda por Bosch y Meiser en 1922 [11]. En todas estas aplicaciones, se utilizó el CO₂ recuperado de otros procesos industriales (síntesis de descomposición de amoníaco o de rocas carbonatadas para la producción de CaO). Tales procesos son reacciones térmicas que se producen en una gama de temperatura moderada, que no excede de 200°C. En 1970 se introdujo la conversión catalítica de CO₂ con el proceso ICI para la síntesis de metanol a partir de un gas de síntesis enriquecido con CO₂, y la producción de carbonatos orgánicos a partir de epóxidos y CO₂ [8].

Ya en 1744, Joseph Priestley consiguió disolver por primera vez el CO₂ en agua obteniendo una disminución de temperatura del líquido, por lo cual dedujo que el fluido poseía propiedades termodinámicas convenientes para que fuera utilizado en refrigeración. La primera planta industrial para producir CO₂ fue construida por la compañía alemana Maschinenfabrik Sürth en 1875 (absorbida por Linde, en su departamento de refrigeración, en 1920).³¹ Una de las primeras aplicaciones industriales del CO₂ es su uso como refrigerante [12], patentado por Alexander Twining en 1850. En esos años, una de las grandes áreas de interés técnico era la producción de frío, sobre todo para la conservación y el transporte de alimentos, por lo que numerosos científicos e ingenieros usaban los conceptos de calor y frío de la termodinámica, y el conocimiento de las propiedades físico-químicas de

³¹https://www.the-linde-group.com/internet.global.thelindegroup.global/en/images/chronicle_e%5B1%5D14_9855.pdf
Consultado el 24 de agosto de 2017

determinados compuestos para desarrollar máquinas de frío. El científico e ingeniero Thaddeus S.C. Lowe fue el primero que diseñó y construyó una máquina para producir hielo usando CO_2 como refrigerante en 1867. Asimismo, en 1880, Windhausen desarrolló el concepto de una unidad de compresión-refrigeración usando CO_2 como refrigerante. Por su parte, Carl Linde también diseñó una máquina para Krupp en 1882.

Asimismo, en el siglo XIX se inventó otra de las grandes aplicaciones del CO_2 , su uso como extintor de incendios, debido a su carácter no inflamable. El extinguidor soda-ácido fue patentado por primera vez en 1866 por el francés Francois Carlier, quien mezcló una solución de agua y bicarbonato de sodio con ácido tartárico, produciendo el gas propulsor CO_2 .³²

Otra de las aplicaciones más conocidas del CO_2 es su uso en bebidas carbonatadas o carbónicas.³³ El inventor del agua carbonatada es Joseph Priestley (el mismo que descubrió su potencial como refrigerante). Priestley vivía cerca de una destiladora y estaba intrigado por las burbujas de dióxido de carbono que se elevaban dentro de su cerveza. Estas le dieron la idea de carbonatar el agua artificialmente, para ello diseñó en 1767 un ingenioso aparato que le permitió disolver la suficiente cantidad de gas para poder ofrecer una bebida con burbujas, que encontró refrescante.³⁴ La fabricación de estas bebidas comenzó en Nueva York en 1832, cuando John Matthews inventó un aparato para mezclar agua con gas de dióxido de carbono y, además, agregarle sabor. De la popularidad de la bebida nacieron negocios para mezclar el agua carbonatada con diferentes sabores como naranja, limón, uva, etc., conocidas genéricamente como sodas. En aquella época, la

³² https://en.wikipedia.org/wiki/Fire_extinguisher

³³ Industrialmente el agua carbonatada se prepara añadiendo CO_2 al agua en tanques de almacenamiento a presión. La presión aumenta la solubilidad (es decir, se disuelve más CO_2 que bajo condiciones atmosféricas normales). La cantidad de CO_2 que se añade suele variar entre 6 y 8 g por litro. De este proceso se obtiene, como residuo, carbonato de calcio. Cuando se reduce la presión, por ejemplo, al abrir la botella, el gas se disocia de la solución, creando las burbujas características.

³⁴ https://historiaybiografias.com/relatos_quimicos4/

gaseosa también se vendía en farmacias como remedio para curar diversas enfermedades. En 1885, W. B. Morrison, un farmacéutico propietario de Old Corner Drug Store en Waco, Texas, desarrolló un sabor especial en su fuente de soda. Se le denominó Dr Pepper®, la gaseosa más antigua que aún se vende en Estados Unidos. Al año siguiente (1886), otro farmacéutico de la ciudad de Atlanta, llamado John S. Pemberton, experimentó con hierbas y especies como la nuez de cola africana y la hoja de coca. El resultado fue una bebida que bautizó con el nombre de Coca-Cola®. En 1898, un farmacéutico de Carolina del Norte, Caleb Bradham, buscaba un tónico para el dolor de cabeza al que le agregó pepsina, una enzima digestiva que degrada las proteínas en el estómago. En 1903, registró la marca de esta bebida como Pepsi®. Con estos descubrimientos nació una nueva industria, la de las gaseosas, que en la actualidad mueve miles de millones de dólares, siendo su origen, curiosamente, la búsqueda de un remedio medicinal.

Desde mediados del siglo XIX y hasta la actualidad, el número de aplicaciones industriales del CO₂ ha ido aumentando considerablemente, con un interés creciente en los últimos años.

De manera esquemática, la utilización o valorización del CO₂ para distintas aplicaciones a gran escala puede clasificarse en tres categorías: usos directos o tecnológicos, usos biológicos y usos químicos [5],[13]. Los llamados usos directos del CO₂ implican, como su nombre indica, el uso del CO₂ como molécula, sin convertir o reaccionar químicamente, en distintas tecnologías y aplicaciones de mercado, por ejemplo, extinción de incendios, extracción de compuestos con CO₂ supercrítico, conservación de alimentos, tratamiento de aguas, o limpieza en seco, entre otras.³⁵ En muchas de estas aplicaciones el CO₂ sustituye a otros compuestos tóxicos o que tienen una capacidad de calentamiento global muy superior, o permite mejorar un producto necesario

³⁵ Existen muchas más aplicaciones de las aquí mencionadas y la lista, afortunadamente, sigue creciendo. Aquí se citan solo algunas, a modo de ejemplo.

para la vida (tales como los alimentos y el agua). Por poner un ejemplo conocido, el CO₂ se utiliza cada vez más en la conservación de alimentos; aunque las cantidades que se usan son muy pequeñas (por ejemplo, en atmósferas protectoras o modificadas³⁶), su uso permite alargar la vida útil de los alimentos, evitando su deterioro, y, por tanto, contribuyendo al desarrollo sostenible. Asimismo, el CO₂ supercrítico puede reemplazar a compuestos clorofluorocarbonados (CFC), que tienen un potencial de calentamiento global en torno a 2.000 veces superior al del CO₂, en muchas de sus aplicaciones actuales. Así, incluso si parte del CO₂ vuelve a la atmósfera, su uso frente a otros compuestos más perjudiciales proporcionará un beneficio ambiental neto.

Por utilización biológica (o biológica mejorada) se entiende la fijación del CO₂ en biomasa, con su consiguiente utilización en distintos sectores, por ejemplo, el cultivo de microalgas para producción de biocombustibles. Esta aplicación tiene un gran potencial, especialmente si se mejora la eficiencia de conversión para producir biocombustibles y otros productos de alto valor añadido, y se usan de manera inteligente los recursos energéticos necesarios para producirlas.

Finalmente, entendemos por utilización química la conversión del CO₂ en otros productos. Aquí la clave no está en cuánto CO₂ se utiliza, sino, en la introducción de tecnologías innovadoras que lleven a la reducción de energía y materiales. El CO₂ puede ser usado en reacciones químicas para producir carboxilatos, carbonatos y carbamatos, que se obtienen por la incorporación

³⁶ El CO₂ ejerce un efecto inhibitor sobre el crecimiento bacteriano, sobre todo el que provoca la pérdida de color y malos olores. Así mismo, tiene un efecto fungicida, retrasando el crecimiento de hongos.

El envasado en atmósfera protectora (EAP) o modificada (MAP), normalmente combinado con una temperatura reducida, es una técnica que consiste en envasar los alimentos en un entorno donde se ha modificado la composición de los gases presentes en la atmósfera, permitiendo, entre otras ventajas, alargar la vida útil de los alimentos. En Europa, el EAP implica principalmente el uso de tres gases: dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno. Los alimentos se envasan usando un único gas o la combinación de estos tres gases, dependiendo de las propiedades químicas y físicas del alimento. <http://www.carbueros.com/~media/Files/PDF/industries/food/es-ES-map-handbook.pdf>

de la molécula completa de CO_2 . Existen también procesos en los que la molécula de CO_2 se reduce a moléculas C-1 (metanol) o C-n.

Cabe señalar que, en la actualidad, la mayoría de las aplicaciones industriales del CO_2 están relacionadas con su uso directo, y no evitan su emisión a la atmósfera, por lo que se está llevando a cabo un gran esfuerzo en desarrollar aplicaciones que lo capturen de manera permanente, sobre todo mediante su conversión química. El problema que tienen en la actualidad la mayoría de las reacciones mencionadas es que, dada la estabilidad de la molécula de CO_2 , es preciso aportar energía para que se lleve a cabo la reacción. Si se mejorara la eficiencia energética para convertir el CO_2 en combustibles para usos energéticos o para otros productos, es evidente que se podrían emplear cantidades de CO_2 muy superiores que las que se usan actualmente. Ello supondría un gran paso adelante en el desarrollo y la aplicación de productos y procesos energéticos con un nivel de emisiones cercano a cero. Como indica el Profesor Aresta, experto mundial en utilización de CO_2 , el paradigma de cambiar al uso de fuentes de energía perenne, como la energía solar, eólica y geotérmica, posibilita el uso de las reacciones que son más intensivas en energía, pero que producen combustibles que tienen un gran mercado [8].

Se detecta, pues, la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías beneficiosas para el medio ambiente que permitan expandir los usos actuales del CO_2 , que, caso de ser capturado para evitar su emisión a la atmósfera, tendremos disponible en grandes cantidades. Por lo que respecta a los requisitos de los nuevos procesos, es preciso que éstos reduzcan el número de emisiones (en unidades de CO_2 -equivalente con respecto a los procesos a los que sustituyen); asimismo, deben consumir menos energía y materiales, ser más seguros, trabajar en mejores condiciones medioambientales, y, por supuesto, ser económicamente viables [5].

A pesar del reto que esto significa, la realidad es que en la actualidad existen usos tecnológicos, biológicos y químicos que cumplen todos los requisitos, y se está avanzando en el desarrollo e implantación de nuevas tecnologías que pueden realzar y potenciar aún más esos usos, ayudando a la economía y al desarrollo sostenible. No debemos olvidar, sin embargo, que se debe cuantificar siempre cual es la ganancia ambiental neta de esas nuevas aplicaciones, para lo cual se están desarrollando y aplicando herramientas de análisis de ciclo de vida.³⁷

El desarrollo de tecnologías que permitan la utilización del dióxido de carbono en diferentes campos se encuentra en pleno auge.³⁸ Actualmente, la utilización de CO₂ aparece reflejada como uno de los objetivos de diferentes programas de trabajo de diversas convocatorias de I+D, especialmente en subvenciones Europeas como las LIFE+, Eco-Innovation, y Horizon 2020, entre otras, donde predominan los temas relacionados con el medioambiente, la sostenibilidad, la reutilización de recursos y las energías renovables.

Asimismo, Elsevier lanzó en 2013 la revista científica especializada *Journal of CO₂ Utilization*, con un factor de impacto actual de 4.3 (primer cuartil). La revista ofrece una plataforma única, de carácter multidisciplinar, para el intercambio de nuevas investigaciones en el campo de la utilización de CO₂ para científicos e ingenieros que investigan en las áreas de productos químicos, combustibles y materiales. Tal y como describe en sus objetivos, la revista busca la difusión de la investigación de vanguardia desde la ciencia

³⁷ El análisis de ciclo de vida o ACV es una metodología empleada en el estudio de un producto y de su proceso de producción, que permite evaluar el impacto potencial sobre el ambiente de un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida mediante la cuantificación del uso de recursos ("entradas" como energía, materias primas, agua) y emisiones ambientales ("salidas" al aire, agua y suelo) asociados con el sistema que se está evaluando. El ACV se lleva a cabo basado en las normas internacionales ISO 14040 (principios y marco de referencia para el ACV) e ISO 14044 (requisitos y directrices para el ACV), adoptadas en español por AENOR como UNE-EN ISO 14040 y UNE-EN ISO 14040.

³⁸ Algunas de las aplicaciones que se están desarrollando hoy en día en laboratorios de todo el mundo aún han de ser validadas a nivel de planta piloto, debiendo mostrarse también su viabilidad económica a gran escala, para que sean transferibles a la industria.

básica al desarrollo de nuevos procesos, tecnologías y aplicaciones del CO₂, incluyendo el CO₂ como materia prima en los sectores químico, energético y de materiales, y la utilización en general para ayudar a minimizar el impacto ambiental, muchos de los temas que hemos tratado aquí, y que siguen siendo de interés científico y aplicado.

El CO₂ supercrítico, un solvente “limpio”

Tras conocer la “cara mala” del CO₂ resulta chocante decir que al CO₂ se le considera un solvente limpio (o verde). Sin embargo, si pensamos en su potencial de calentamiento global, no resulta difícil entender por qué es así. De hecho, ya hemos mencionado que una de las grandes aplicaciones industriales del CO₂ es su uso como fluido supercrítico, donde reemplaza a otros solventes. Ahora bien, ¿qué es un fluido supercrítico?

Pasemos a definir algunos conceptos previos. Una fase es una región homogénea de materia en la que no hay variación espacial en la densidad media, la energía, la composición u otras propiedades macroscópicas. La coexistencia de fases en equilibrio termodinámico entre sí, en un sistema que consta de dos o más fases, se llama equilibrio de fase. Los ejemplos más simples de equilibrio de fase son el equilibrio de un líquido y su vapor saturado, tal como el agua líquida y su vapor, y el equilibrio de un líquido con su fase sólida, tal como agua líquida y hielo en el punto de fusión del hielo. La temperatura a la que tiene lugar una transición de fase -por ejemplo, un punto de ebullición o un punto de fusión- varía con la presión.

Los gráficos que representan la interrelación de las diversas variables termodinámicas en el equilibrio de fase se llaman curvas o superficies de transición de fase; un conjunto de tales curvas o superficies se conoce como diagrama de fases. Una curva de transición de fase puede intersectar otras dos curvas de transición de fase en un punto triple (coexistencia del sólido, líquido y vapor) o terminar en un punto crítico. En el punto crítico las

densidades de las fases líquida y gaseosa se hacen iguales y la distinción entre ellas desaparece, dando como resultado una sola fase, llamada supercrítica. Un fluido supercrítico es, pues, cualquier sustancia a una temperatura y presión por encima de su punto crítico. Cerca del punto crítico, pequeños cambios en la presión o temperatura dan lugar a grandes cambios en la densidad. Además, no existe tensión superficial en un fluido supercrítico, ya que no hay límite entre la fase líquida y la fase gaseosa. Cambiando la presión y la temperatura del fluido, las propiedades pueden ser "sintonizadas" para que sean más similares a las del líquido o más similares a las del gas, lo que permite, como consecuencia, aumentar la solubilidad o la reactividad de compuestos específicos en la fase supercrítica [14].

El punto crítico fue descubierto en 1822 por el barón Charles Cagniard de la Tour, ingeniero y físico francés. Cagniard de la Tour mostró, tras hacer el vacío en una ampolla de vidrio y llenar dos quintos de su volumen con alcohol etílico, que al calentarla el líquido se expandía hasta que llegaba un momento en que desaparecía. Según Cagniard de la Tour o bien el líquido se había convertido totalmente en vapor, o bien no podía distinguir entre el líquido y el vapor. Cagniard de la Tour investigó también el éter sulfúrico y el agua, y concluyó que "para toda sustancia existen, una presión, un volumen y una temperatura llamados punto crítico, tales que si el líquido se somete a ellos, se transforma en gas" [15]. Sus investigaciones sobre el efecto de la presión en el punto de ebullición de los líquidos le permitieron determinar la temperatura crítica del agua.

Fue Michael Faraday quien desde 1823, y durante una serie de años, trabajó de manera exhaustiva y sistemática en la posibilidad de la licuefacción de los gases [16]. Sus experimentos en este campo forman parte importante de la base experimental que permitió entender la necesidad de los diagramas de

fase y el posterior desarrollo de la ciencia de bajas temperaturas, con la consecuente tecnología asociada.

Años más tarde, el científico irlandés Thomas Andrews, a través de sus estudios con CO₂ a presión a distintas temperaturas, reconoció en 1869, la existencia del punto crítico de este compuesto, determinando su temperatura crítica en 31,1°C. Andrews sugirió que existía una temperatura crítica para cada compuesto. A partir de los estudios rigurosos llevados a cabo por Andrews se entendió la utilidad de construir diagramas de las distintas fases de las sustancias, por los se pueden conocer las condiciones de presión y temperatura a las cuales una sustancia dada estará en equilibrio en una o más fases o alcanza su punto crítico.

En 1879, Hannay y Hogart midieron la solubilidad de distintos sólidos en fluidos supercríticos. Estos trabajos abrieron la investigación sobre las propiedades y aplicaciones de los fluidos supercríticos, la mayoría de ellas como solvente.

¿Por qué se le denomina al CO₂ supercrítico solvente limpio? Un problema importante con el que se encuentran las industrias de procesamiento de alimentos, fármacos, textiles y otras es el de los disolventes, ya que manejan grandes volúmenes de estos compuestos, con el consiguiente riesgo ambiental y el elevado coste que implica su posterior tratamiento como residuo. Entre estos disolventes comunes se encuentra la acetona, el acetonitrilo, el hexano, el metanol, el estireno, el tolueno, la trementina, y los disolventes halogenados, entre ellos los CFCs, que ya han sido prohibidos y retirados en virtud del Protocolo de Montreal. El CO₂ a presión y temperaturas moderadas³⁹ muestra unas propiedades muy parecidas a estos

³⁹ Las condiciones de operación de los procesos con CO₂ supercrítico son relativamente “suaves” en cuanto al rango de temperaturas y presiones, recordemos que la temperatura crítica del CO₂ es 31,1°C y su presión crítica 72,8 atm, frente al punto crítico del agua, por ejemplo, que es de 374 °C y 218,3 atm. Esto permite trabajar en condiciones seguras, sin un gran consumo energético, y evitando problemas de corrosión e integridad de materiales que ocurren a condiciones de operación más extremas.

compuestos, pudiendo usarse con mayor seguridad y menor impacto ambiental en procesos industriales donde se emplean disolventes orgánicos. De hecho, el uso del CO₂ como alternativa a los disolventes orgánicos es lo que ha permitido el desarrollo de lo que se denomina tecnología de fluidos supercríticos, basadas en la posibilidad de ajustar la solubilidad de un compuesto en CO₂ supercrítico simplemente cambiando la presión y temperatura de operación.

Aunque en sus inicios la tecnología de fluidos se planteó como una alternativa al uso de disolventes orgánicos, su aplicación se ha ido expandiendo a múltiples campos en los últimos veinticinco años, incluyendo áreas tan diversas como la alimentación, la síntesis de nuevos materiales, el procesamiento de plásticos, la limpieza de pieles, la extracción de compuestos de alto valor añadido, el lavado de ropa en seco, los equipos electrónicos, la extracción de grasas, etc.

La extracción química es un procedimiento de separación de una sustancia que puede disolverse en dos disolventes no miscibles entre sí, con distinto grado de solubilidad y que habitualmente están en contacto a través de una interfaz. La extracción química está limitada por dos mecanismos: la solubilidad del extracto (producto a separar) en el disolvente y la transferencia de materia entre la matriz donde se encuentra el extracto y el disolvente.

Los fluidos supercríticos presentan ventajas en los procesos de extracción química frente a otros disolventes ya que, al comportarse como un líquido, facilitan la disolución de los solutos, a la vez que su comportamiento como gas favorece la transferencia, permitiendo una fácil separación de la matriz. Esto conlleva un proceso de extracción más rápido, eficiente y selectivo que en el caso de la extracción líquido-líquido (proceso tradicional de extracción).

Entre las aplicaciones industriales de la extracción con CO₂ supercrítico destacan la obtención de la cafeína del café y del té, del lúpulo para producir cerveza, de los pesticidas contenidos en los cereales, de productos naturales como la resina del pimentón o aceites esenciales. También se utiliza el CO₂ supercrítico para la extracción de grasa del cacao, de la piel o de piezas metálicas, para la limpieza de los microchips electrónicos, la eliminación del TCA (tricloroanisol) del corcho y para la limpieza en seco de la ropa.

La tecnología de fluidos supercríticos ha permitido mejoras significativas en varios procesos industriales y todavía hay muchas oportunidades para nuevas aplicaciones en diversas áreas emergentes.⁴⁰ Por ejemplo, en temas de alimentación, donde el creciente interés público por el consumo de alimentos más saludables y con un mayor valor nutritivo y comercial, junto con las regulaciones ambientales, cada día más exigentes, han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías limpias para el procesamiento de los alimentos. En este sentido, la tecnología de fluidos supercríticos se ha posicionado como una excelente alternativa, ya que con estos fluidos se pueden obtener productos de mayor pureza y con mejores propiedades organolépticas que con los solventes tradicionales.

Para optimizar las condiciones de operación de procesos con fluidos supercríticos se necesita una caracterización precisa de esta región usando métodos y modelos de la físico-química. El creciente número de aplicaciones industriales cerca de las condiciones críticas ha animado a los investigadores a buscar una descripción precisa del comportamiento termodinámico de los fluidos puros y sus mezclas en las inmediaciones del punto crítico. Sin embargo, el complejo comportamiento molecular de cualquier compuesto en estas condiciones hace que sea una tarea difícil [14]. En la zona próxima a la región crítica, las fluctuaciones de densidad y concentración causadas por las

⁴⁰ La tecnología está teniendo un auge especial en el continente asiático, un continente en expansión demográfica y económica, gran consumidor de productos y extractos naturales.

correlaciones de largo alcance entre todas las moléculas conducen a singularidades de las propiedades puras del compuesto (y mezclas) en el punto crítico. El valor de algunas propiedades (por ejemplo, la velocidad del sonido, la capacidad calorífica isocórica, la compresibilidad térmica, etc.) cambian muy rápidamente con una pequeña modificación de las condiciones de operación.⁴¹ Esto significa que a menos que exista un método preciso para describir la región, pequeñas desviaciones en los cálculos pueden conducir a errores grandes para las condiciones finales de operación del proceso.

Desde el punto de vista matemático, la aproximación al punto crítico conduce a un comportamiento asintótico no analítico distinto al observado lejos de la región crítica. Esto se conoce generalmente como el cruce del comportamiento clásico al no-clásico, o de *crossover*, por su nombre en inglés [17]. Desde un punto de vista microscópico, la teoría clásica de los puntos críticos corresponde a una aproximación de campo medio, que no considera las fluctuaciones locales de inhomogeneidad⁴² en la densidad. Es bien sabido que el comportamiento crítico no clásico de las propiedades termodinámicas es una consecuencia de las fluctuaciones de largo alcance de un parámetro de orden, la densidad para el caso de fluidos puros. La extensión espacial de las fluctuaciones de densidad diverge en el punto crítico y se hace más grande que cualquier escala molecular en la región crítica, siendo las causantes del comportamiento anómalo de esta región. Sólo teorías que expliquen estas fluctuaciones de la densidad pueden proporcionar la aproximación correcta al punto crítico. De hecho, la mayoría de las ecuaciones de estado, precisas para describir el equilibrio líquido-vapor, no pueden reproducir este cambio de comportamiento en la región

⁴¹ Por ejemplo, la conductividad térmica tiende al infinito a medida que la temperatura se aproxima a la temperatura crítica cuando uno se aproxima al punto crítico desde la región de dos fases con una densidad igual a la crítica.

⁴² Los sistemas inhomogéneos son aquellos que poseen propiedades intensivas diferentes en, por lo menos, dos puntos del sistema pero sin superficies de discontinuidad. Ejemplos: el aire y el agua de mar.

casi crítica porque se basan en teorías de campo medio. Por lo tanto, la estimación rigurosa del equilibrio líquido-vapor, cerca y lejos de la región crítica, requiere un tratamiento específico teniendo en cuenta las fluctuaciones de largo alcance a medida que uno se aproxima al punto crítico. Uno de los tratamientos más exitosos proviene de la teoría de escalas de Kenneth Wilson de 1971 [18],⁴³ basada en cómo las propiedades y fuerzas fundamentales de un sistema varían dependiendo de la escala sobre la que se miden. Wilson ideó una estrategia para calcular cómo se producen las transiciones de fase, considerando cada escala por separado y luego abstrayendo la conexión entre los contiguos, en una nueva formulación de la teoría del grupo de renormalización que le valió el Nobel de Física en 1982. Las ideas de Wilson han sido incorporadas a ecuaciones de estado modernas con base molecular empleadas posteriormente en el diseño de procesos con CO₂ supercrítico, siendo un campo de intensa actividad científica en la actualidad. La precisión implica una estimación mejor de las condiciones de operación, evitando posibles separaciones de fase indeseadas (si se ha subestimado el punto crítico) o presiones de trabajo más altas de las requeridas (si se ha sobreestimado). Se demuestra así, una vez más, que el conocimiento de la física que rige el sistema, y de sus propiedades físico-químicas, es esencial para el posterior desarrollo de procesos industriales sostenibles.

Del CO₂ a los nuevos refrigerantes con bajo potencial de calentamiento atmosférico

Igual que la físico-química ha jugado un papel esencial en el conocimiento de las causas del efecto invernadero, su relación con el CO₂ y otros gases de efecto invernadero, y en el desarrollo de las aplicaciones del CO₂, también

⁴³ Wilson se interesó por el cambio de estado de la materia y sus efectos en las moléculas, desarrollando la teoría de fenómenos críticos con el cambio de estado.

lo ha hecho, y debe seguir haciéndolo, en el desarrollo de refrigerantes, como veremos a continuación.

Recordemos que una de las primeras aplicaciones industriales del CO₂, descubierta en la segunda mitad del siglo XVIII, es su uso como refrigerante, cuando Joseph Priestley descubrió que el dióxido de carbono y el amoníaco poseen propiedades termodinámicas adecuadas para ser usados como refrigerantes. Estos fueron los dos primeros refrigerantes usados a nivel industrial, seguidos del éter sulfúrico, el dimetiléter, el SO₂, el cloruro de metilo, y determinadas mezclas. Son los denominados refrigerantes de primera generación, que revolucionaron el mundo del frío industrial. Sin embargo, estos compuestos adolecían de unas propiedades que limitaban considerablemente su aplicación, o bien eran poco eficientes, o bien eran inflamables o tóxicos, por lo que la búsqueda de otros refrigerantes siguió siendo un tema prioritario.

En 1930 Thomas Midgley, de Dupont, anunció el primer fluorocarbono, el Freon-12, comenzando así la era de la segunda generación de refrigerantes, los compuestos clorofluorocarbonados (CFCs).⁴⁴ Estos productos resultaron ideales como refrigerantes porque eliminaban en gran parte los inconvenientes de los productos anteriores, al ser muy eficientes, no inflamables y no tóxicos (las fugas de los equipos de refrigeración anteriores habían provocado muertes por envenenamiento, y explosiones). Sin embargo, a partir del hallazgo de Frank Sherwood Rowland y Mario Molina en 1974⁴⁵, de la influencia de estos gases en la formación del agujero de la

⁴⁴ Thomas Midgley desarrolló el tetraetilo de plomo, que durante décadas fue un aditivo para la gasolina, y más tarde los CFCs, para reemplazar a los refrigerantes tóxicos e inflamables de entonces. Ambos productos han determinado ser grandes contaminantes de la atmósfera. Llegó a registrar 177 patentes. <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/m/midgley.htm>

⁴⁵ Molina y Rowland demostraron que los gases de compuestos orgánicos artificiales se combinan con la radiación solar y se descomponen en la estratosfera liberando átomos de cloro y moléculas de monóxido de cloro que individualmente son capaces de descomponer gran número de moléculas de ozono. Sus investigaciones se publicaron en Nature en 1974 [19].

capa de ozono [19], se hizo necesaria la búsqueda inminente de otras alternativas para reemplazarlos. En el protocolo de Montreal de 1987 se estableció como fecha para la desaparición de los CFCs el 1 de enero de 1996 y para los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) el 1 de enero de 2030, posteriormente adelantada al 2014 a nivel global. Desde el 1 de enero de 2010 está prohibido utilizar HCFC puros para el mantenimiento y recarga de equipos existentes en esa fecha y desde el 1 de enero de 2015, el uso de HCFC reciclados.

En el último par de décadas estos compuestos han sido sustituidos en unidades de refrigeración por los hidrofluorocarbonos (HFC) como alternativa a los de segunda generación, ya que no agotan la capa de ozono. Son los llamados refrigerantes de tercera generación. Sin embargo, se sabe que los HFC son gases de efecto invernadero con un elevado potencial de calentamiento global, miles de veces más alto que el dióxido de carbono, por lo que es urgente buscar otra clase de refrigerantes para reemplazarlos. El año 2016 marcó el lanzamiento de un acuerdo global, firmado en Kigali, como enmienda al Protocolo de Montreal, con el objetivo de controlar (y eliminar paulatinamente) el uso de los HFCs a partir del año 2019. Los investigadores esperan que este acuerdo conduzca a la reducción del calentamiento del planeta a la mitad de un grado centígrado, paliando así parte del aumento de la temperatura del planeta. Sin embargo, se prevé que en el año 2050 se activarán alrededor de 1.600 millones de nuevas unidades de aire acondicionado [20]. Como resultado, se necesita diseñar e implementar en distintas aplicaciones nuevos refrigerantes que sean ambientalmente más amigables pero que sigan funcionando con las mismas prestaciones que los HFCs convencionales.⁴⁶ Aquí la físico-química juega,

⁴⁶ Para hacernos una idea de lo que esto significa, sepamos, por ejemplo, que el 1,1,1,2-tetrafluoroetano (HFC-134a), que es el refrigerante más comúnmente usado en los aires acondicionados, tiene un PCA de 1300. Los otros HFCs tienen un PCA similar.

de nuevo, un papel esencial. El descubrimiento y diseño de estas sustancias requiere un entendimiento profundo de la termodinámica de los refrigerantes utilizados actualmente para establecer el punto de referencia para cualquier nuevo desarrollo.

El Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos ha establecido recientemente como una de las máximas prioridades la investigación y el desarrollo de nuevos refrigerantes [21], con énfasis en las mezclas azeotrópicas, que son aquellas mezclas de fluidos cuyas fases vapor y líquido en equilibrio poseen la misma composición a una presión y temperatura determinadas. La ventaja que presentan estas mezclas es que existe una mayor flexibilidad a la hora de combinar compuestos buscando esas propiedades *a la carta*, que si buscáramos un compuesto puro a esa presión y temperatura. De acuerdo con el DOE, la máxima prioridad para la investigación y el desarrollo de refrigerantes de cuarta generación debe centrarse en explorar y modelar las propiedades termofísicas y de transferencia de calor de las mezclas azeotrópicas de bajo PCA. Entender el comportamiento de fases y predecir con precisión las propiedades termofísicas de estos sistemas es esencial para diseñar y evaluar las prestaciones de los ciclos de refrigeración y determinar las composiciones óptimas para ellos.

Este es un nuevo campo de investigación, ya que a pesar de la demanda urgente de desarrollar nuevos refrigerantes con bajo potencial de calentamiento global para reemplazar a los HFC, la cantidad de artículos que aparecen en la bibliografía es aún muy limitada, y en muy pocos casos centrados en las mezclas azeotrópicas sugeridas por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de los Estados Unidos (NIST) [22]. Estas mezclas presentan una gran desviación con respecto al comportamiento ideal, por lo que se requieren modelos precisos para caracterizarlos, otro campo de

investigación en el que los físico-químicos podemos aportar nuestro granito de arena.

En respuesta a esta necesidad, el NIST ha recomendado una lista de refrigerantes que tendrían valores bajos de PCA basados en estimaciones hechas muy recientemente utilizando datos sobre la estructura química, la eficiencia radiativa y la duración de la vida atmosférica de estas moléculas [23],[24]. Basándose en esos criterios ambientales y termodinámicos, las hidrofluoroolefinas (HFO) emergen como la mejor opción disponible hasta ahora. En 2007 se anunció una empresa conjunta entre Honeywell y Dupont para producir 2,3,3,3-tetrafluoropropeno (HFO-1234yf), como alternativa de cuarta generación para el refrigerante R-134a⁴⁷ en vehículos [25]. Con un PCA de 4, el HFO-1234yf satisface perfectamente los valores actuales de regulación europea No 517/2014 de gases fluorados (o gases-F).⁴⁸ Tanto desde el sector académico como industrial (con Honeywell a la cabeza) se están desarrollando otras moléculas, y mezclas azeotrópicas de ellas, que puedan ser llevadas al mercado en un tiempo record, para cumplir con la regulación europea de los gases-F y con el Acuerdo de Kigali [26].

Consideraciones finales

Normalmente existe una correlación directa entre el desarrollo económico y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Los esfuerzos actuales están dando su fruto, de acuerdo con el informe emitido por la Agencia Internacional de la Energía en 2017,⁴⁹ las emisiones globales del

⁴⁷ De fórmula química CH₂FCF₃, pertenece a la familia de los HFCs, presentando un PCA de 1430. También es conocido como 1,1,1,2-tetrafluoroetano, Freon 134a, Forano 134a, Genetron 134a, Florasol 134a, Suva 134a, HFC-134a y norflurano (INN). En la actualidad se usa, sobretodo, en equipos domésticos de refrigeración y en aires acondicionados de vehículos. <https://en.wikipedia.org/wiki/1,1,1,2-Tetrafluoroethane>

⁴⁸ EU Regulation No 517/2014. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2014/150/L00195-00230.pdf>

⁴⁹<https://www.iea.org/newsroom/news/2017/march/iea-finds-co2-emissions-flat-for-third-straight-year-even-as-global-economy-grew.html>

sector energético se situaron en 2016 en 32,1 gigatoneladas, igual que en los dos años anteriores, mientras que la economía global creció 3,1%. Se observa así, por primera vez desde 1990 un desacoplamiento entre el crecimiento económico y estas las emisiones, ya que durante la crisis del 2008 y años posteriores, hubo un ligero descenso general de las emisiones de GEI, claramente correlacionado con la desaceleración económica. En 2016 las emisiones de dióxido de carbono disminuyeron en Estados Unidos y China, los dos mayores emisores y usuarios de energía del mundo, y se mantuvieron estables en Europa, compensando los incrementos en la mayor parte del resto del mundo. La mayor caída se produjo en Estados Unidos, donde las emisiones de dióxido de carbono cayeron un 3%, o 160 millones de toneladas, mientras que la economía creció un 1,6%. La disminución fue impulsada por un aumento en los suministros de gas de pizarra o gas de esquistos (*shale gas* en inglés)⁵⁰ y por los costes más bajos y menor intermitencia de las energías renovables, que desplazaron al carbón. Las emisiones en Estados Unidos el año pasado se situaron en su nivel más bajo desde 1992, mientras que durante el período transcurrido desde entonces la economía creció un 80%. Por su parte, en China, las emisiones disminuyeron un 1% el año pasado, ya que la demanda de carbón disminuyó, mientras que la economía se expandió un 6,7%. Esta tendencia se debe a una creciente participación de las energías renovables, nuclear y gas natural en el sector eléctrico, junto con el cambio del carbón al gas en el sector industrial y de edificios, impulsado en gran parte por las políticas gubernamentales de lucha contra la contaminación atmosférica. Cabe recordar que precisamente China y Estados Unidos han sido duramente criticadas por no haber firmado el

⁵⁰ El gas de pizarra se encuentra atrapado en estratos o capas de pizarra a mucha profundidad (desde los 400 a los 5000 metros). Dado que la pizarra tiene una permeabilidad muy baja, el gas está distribuido en pequeños poros o burbujas, muchas veces microscópicas, no conectadas entre sí, lo que hace necesario romper las capas de pizarra para conseguir reunir el gas y que fluya hacia la superficie para ser recogido. La técnica que se utiliza para llevar a cabo la extracción del gas de pizarra (compleja y cara) se conoce con el nombre de fractura hidráulica horizontal o *fracking* en inglés.

protocolo de Kioto, aun así, son estos dos países los que realmente han bajado considerablemente esas emisiones.

Por lo que respecta a nuestro país, y a la espera de datos definitivos, las noticias son alentadoras; tras varios años al alza, España consiguió en 2016 reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Según las estimaciones del Observatorio de la Sostenibilidad, las emisiones contaminantes se redujeron en nuestro país un 3,1% con respecto al 2015. Tal y como reflejó el informe de Red Eléctrica al cierre del año pasado,⁵¹ las buenas condiciones meteorológicas, caracterizadas por más lluvia y más viento, permitieron en 2016 aumentar el aporte de fuentes renovables en la producción de energía (sobre todo la hidráulica, que se disparó un 25%). Por su parte, la quema de carbón –la fuente que más dióxido de carbono emite a la atmósfera- se redujo aproximadamente un 30%. Pese a todo, España sigue emitiendo, a día de hoy, más CO₂ a la atmósfera del que emitía en 1990, año de referencia para el Protocolo de Kioto. Si en aquel año las emisiones fueron de 285,9 millones de toneladas de CO₂ equivalente, ahora estaríamos en los 328,7 millones, según los datos provisionales del Observatorio, por lo que aún queda camino por recorrer.

En cuanto a los usos del CO₂ como medida complementaria a la captura y que ayude a la economía, esta propuesta resulta altamente atractiva, sin embargo, las aplicaciones del CO₂ a gran escala son, a día de hoy, un reto, aunque empieza a dar frutos. Conseguir usos industriales del CO₂ en nuevas aplicaciones que sean sostenibles pasa por entender la molécula y los procesos en los que puede resultar benigna frente a los actuales. Se nos abre así a los científicos un mundo apasionante, ¿Quién sabe que nuevas aplicaciones e inventos nos quedan por descubrir?

⁵¹<http://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/informe-anual/informe-del-sistema-electrico-espanol-2016>

Por otra parte, hemos visto que la lucha contra el cambio climático no se refiere, ni mucho menos, solo a evitar las emisiones de CO₂. El desarrollo de nuevos refrigerantes de cuarta generación, no inflamables, no tóxicos, eficientes, que no dañen la capa de ozono y con bajo potencial de calentamiento atmosférico se presenta como un reto para la ciencia y la ingeniería, donde el conocimiento de sus propiedades físico-químicas es parte esencial de su solución.

Se necesitan recursos para llevar a cabo esa investigación y transferencia tecnológica, pero, sobre todo, se necesitan científicos dispuestos a adaptar y expandir sus horizontes de investigación aplicando sus conocimientos en este campo, o aprendiendo nuevos conocimientos que puedan ser aprovechados con éxito. Como decía el gran Charles Darwin: “En las especies no sobrevive el más fuerte, ni el más inteligente, sino aquel que mejor se adapta al cambio.”

Siempre aconsejo a mis estudiantes y colaboradores cuando preparan una presentación o una clase, que se centren especialmente en una o dos ideas que quieran que su audiencia tenga claras al acabar. En este caso, espero haberles convencido de que, por una parte, es necesario seguir trabajando en buscar soluciones científicas alternativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y buscar tecnologías sostenibles que reemplacen a las actuales, siendo el conocimiento físico-químico una herramienta esencial para ello, y por otra, que ese conocimiento debe ser aplicado y transferido a la sociedad para que realmente sea efectivo. Investigar desde esta perspectiva ayudará a que la ciencia de nuestro país no solo produzca artículos de calidad, sino también patentes y productos comerciales, que permitan, además de mejorar el medioambiente, cambiar el motor de la economía de nuestro país. Soñar es gratis, pero, si los sueños además se cumplen, mejor. Me gustaría acabar este discurso expresando mi sincera y profunda gratitud a los miembros de Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y

Naturales de Granada por aceptar, a propuesta de la Sección de Físico-Químicas, mi ingreso entre sus miembros. Esto supone para mí un gran honor y un privilegio del cual espero estar a la altura, contribuyendo a todo aquello que de mí se necesite.

Quiero agradecer muy especialmente al profesor Roque Isidro Hidalgo Álvarez la aceptación, por su parte, del encargo de la Academia de realizar el discurso de contestación. Para mí el Académico Roque Hidalgo es, desde siempre, un modelo a seguir, tanto humana como científicamente, posee una gran inteligencia, constancia y perseverancia, insaciable curiosidad intelectual, afán de saber, generosidad en la transmisión de ese conocimiento e interés por su aspecto fundamental y aplicado, buscando el bien de la sociedad. Es, así mismo, un apasionado de la historia y un humilde y justo juez, reconociendo y alabando siempre las contribuciones de los demás. Ese saber científico acumulado, combinado con su humildad intelectual y personal, compañerismo, sinceridad, y, de nuevo, generosidad para aquellos que le rodean, lo convierten para mí (y estoy segura que para otros también) en un admirado científico, amigo y ejemplo a seguir. Quizás él mismo no sea consciente de su influyente papel en mi carrera profesional y en la de muchos otros físico-químicos y científicos nacionales e internacionales.

Es de bien nacidos el ser agradecido, reza el refrán popular. No estaría hoy aquí si no hubiera sido por la educación recibida por mis padres y hermanos, que me enseñaron que el sacrificio y la constancia tienen su fruto a largo plazo, que el hacer las cosas bien importa más que el hacerlas y, en palabras de mi padre, que “nunca debes dejar de hacer alguna cosa porque te parezca difícil” (¡cuántas veces he estado tentada de hacerlo y me he acordado de esa frase!). El propio ambiente de estudio y afán de saber vivido desde pequeña hizo que elegir una carrera científica fuese una elección natural. Es una suerte haber nacido y crecido en una familia como la mía.

Y tampoco estaría hoy aquí sin el apoyo incondicional y continuo de Jordi, mi esposo y compañero durante los últimos veinticinco años, y mis hijos Anna, Marta y David. Jordi, hace ya muchos años, me dijo: “yo me he enamorado de una mujer científica y apasionada, y me gustaría que siempre siguieras así”. Probablemente no era consciente de la trascendencia de lo que decía en ese momento, pero seguro que sí ha sido y es consciente, y yo también, de que sin él esto habría sido del todo imposible. Mi mejor compañero, aliado, confidente, colaborador y amigo. Y mis hijos, Anna, Marta y David, para los que tener una madre “viajera” forma parte de sus vidas, ellos desde pequeños han aprendido con toda naturalidad que una molécula puede formar parte de sus juegos infantiles; les he robado tiempo de sus vidas para dárselo a la ciencia, pero juntos hemos compartido la pasión por todo ello. También ellos han aprendido la necesidad de cuidar el legado que se nos ha dado, buscando un mundo más sostenible, y lo manifiestan en infinidad de detalles. Buscar un mundo mejor para ellos es un gran aliciente para seguir haciendo ciencia.

Mis mentores, y muy especialmente el Profesor Keith Gubbins, han jugado otro papel decisivo en mi carrera; su capacidad intelectual, combinada con su permanente afán por aprender (este año ha cumplido ochenta años y sigue en activo en la Universidad de North Carolina en Estados Unidos), su afán desinteresado por orientar y ayudar a sus colaboradores, su preocupación por comunicar sus conocimientos de manera atractiva y simple, y su especial habilidad para aplicar sus conocimientos de físico-química y modelado molecular al mundo industrial, lo convirtieron, desde hace muchos años, en un modelo a seguir. Mis estudiantes de doctorado, desde Felipe J. Blas, que se atrevió a ser mi primer estudiante, cuando yo, recién acababa mi estancia postdoctoral en Cornell, me incorporé a la Universidad Rovira i Virgili, y dejó Sevilla y familia para hacer la tesis, hasta los actuales, mis estudiantes, postdocs y colaboradores, todos han contribuido, no sólo a la producción

científica y patentes, sino, sobre todo, a que mi interés y pasión por la ciencia, por aprender y por colaborar, sigan siempre vivos. Agradezco especialmente a Fèlix Llovell, hoy profesor en el Instituto Químico de Sarriá, todos estos años de entretenida, fructífera y apasionante colaboración y amistad.

Mis colegas del mundo de la empresa también han jugado un papel vital en las ideas que he desarrollado aquí. Mención especial merece José Luis Méndez, uno de los mayores expertos mundiales del CO₂, tanto por su conocimiento desde el punto de vista fundamental, como sobretodo, industrial, habiendo trabajado durante más de cuarenta años con plantas industriales de CO₂ y sus aplicaciones. Como él mismo dice: “mi corazón de ingeniero está hecho de CO₂” (yo creo que el mío un poco también). También Concha Domingo y Sonia Guri han contribuido a perfilar mis ideas y conocimiento en este tema, en un caso sobre el CO₂ supercrítico y sus aplicaciones en el campo de los materiales, y en el otro, en temas de alimentación y tratamiento de aguas. A todos ellos, mi más sincero y profundo agradecimiento.

Muchas gracias a todos ustedes por su amable atención.

Granada, 6 de octubre de 2017

Lourdes Vega Fernández

Bibliografía

- [1] Mann, M. E. *Earth Will Cross the Climate Danger Threshold by 2036*. Scientific American, 1 de abril de 2014.
- [2] Stocker, T.F. y otros (editores). *Cambio climático 2013. Bases físicas. Resumen para responsables de políticas. Informe del Grupo de trabajo I del IPCC*. Disponible en:
https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf
- [3] Hulme, M. *On the origin of 'the greenhouse effect': John Tyndall's 1859 interrogation of nature*. Weather, Vol. 64, No. 5, May 2009. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wea.386/pdf>
- [4] Arrhenius, S. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground*, Londres, Edimburgo, Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (5^a series) 41: 237-275, abril de 1896. Disponible en: http://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf
- [5] Vega, L.F. *El CO₂ como recurso. De la captura a los usos industriales*. Guías técnicas de energía y medio ambiente, 19. Editor: Fundación Gas Natural. ISBN: 978-84-614-1195-5. 2^a edición, 2011.
- [6] Papadopoulos, A.I.; Seferlis, P. (Editors). *Process Systems and Materials for CO₂ Capture: Modelling, Design, Control and Integration*, Wiley, April 2017.
- [7] Bahamon, D. Vega, L.F. *Systematic evaluation of materials for post-combustion CO₂ capture in a Temperature Swing Adsorption process*, Chemical Engineering Journal, 284, 438-447, 2016.
- [8] Aresta, M.; Dibenedetto, A.; Angelini, A. *The changing paradigm in CO₂ utilization*, Review Article. Journal of CO₂ Utilization 3–4, 65–73, 2013.

- [9] Kolbe, H. "Über Synthese der Salicylsäure". (On the synthesis of salicylic acid by Hermann Kolbe). *Annalen der Chemie und Pharmacie*, 1860, 13(1): 125–127. doi: 10.1002/jlac.18601130120
- [10] Solvay, E. Manufacture of soda by the ammonia process. Patent US 263,981 (1882).
- [11] Bosch, G.; Meiser W, Process of manufacturing urea. US 1,429,483 (1922).
- [12] Gantz, C. *Refrigeration. A history*. McFarlan & Company, Inc, Publishers, Jefferson, North Carolina, 2015.
- [13] Vega, L.F. (Coordinadora), varios autores. *Usos del CO₂: un camino hacia la sostenibilidad*. Monográfico editado por la Plataforma Tecnológica Española del CO₂ (PTECO2). Primera edición, abril de 2013.
 Disponible en:
<http://www.pteco2.es/Uploads/docs/Monogr%20El%20fico%20Usos.pdf>
- [14] Vega, L.F. *Fundamentals of Supercritical Fluids and the Role of Modeling*, Cap. 2, en *Supercritical Fluid Nanotechnology: Advances and Applications in Composites and Hybrid Nanomaterials*, Edited by C. Domingo and P. Subra-Paternault, CRC Press, 2015
- [15] Brush, S. G. *The Kind of Motion We Call Heat. vol. 1*, North-Holland, Nueva York, 1986, cap. 7.
- [16] O'Connor Sloane, T. *Liquid Air and the Liquefaction of Gases: A Practical Work Giving the Entire History of the Liquefaction of Gases from the Earliest Times of Achievement to the Present Day*, Norman W. Henley publishing Company, 1919.

- [17] Llovell, F.; Vega, L.F. *Global fluid phase equilibria and critical phenomena of selected mixtures using the crossover soft-SAFT equation*, The Journal of Physical Chemistry B 110 (3), 1350-1362, 2006.
- [18] Wilson, K.G. *Renormalization group and critical phenomena, 2. Phase space cell analysis of critical behaviour*, Phys. Rev. B 4, 3174-3183, 1971.
- [19] Molina, M.J.; Rowland, F.S. *Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone*. Nature 249, 810 - 812 (28 June 1974)
- [20] Shah, N.; Wei, M.; Letschert, V.; Phadke, A. *Benefits of Leapfrogging to Superefficiency and Low Global Warming Potential Refrigerants in Room Air Conditioning*, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Berkeley, CA (United States), 2015.
- [21] Goetzler, W.; Sutherland, T.; Rassi, M.; Burgo, J. *Research & Development Roadmap for Next-Generation Low Global Warming Potential Refrigerants*. Preparedo por Navigant Consulting, Inc. para el Departamento de Energía de los EEUU, Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Building Technologies Office. Noviembre 2014. Disponible en: www.osti.gov/home/
- [22] Fouad, W.A.; Vega, L.F. *Next generation of low global warming potential refrigerants: Thermodynamic properties molecular modeling*, AIChE Journal, 2017. DOI: 10.1002/aic.15859.
- [23] Kazakov, A.; McLinden, M.O.; Frenkel, M. *Computational design of new refrigerant fluids based on environmental, safety, and thermodynamic characteristics*, Ind. Eng. Chem. Res. 51, 12537-12548, 2012.

- [24] McLinden, M.O.; Brown, J.S.; Brignoli, R.; Kazakov, A.F.; Domanski, P.A. *Limited options for low-global-warming-potential refrigerants*, Nat. Commun. 8, 14476, 2017.
- [25] Calm, J.M. *The next generation of refrigerants—Historical review, considerations, and outlook*, Int. J. Refrig. 31, 1123-1133, 2008.
- [26] Mota-Babiloni, A.; Navarro-Esbrí, J.; Barragán-Cervera, Á.; Molés, F.; Peris, B. *Analysis based on EU Regulation No 517/2014 of new HFC/HFO mixtures as alternatives of high GWP refrigerants in refrigeration and HVAC systems*, Int. J. Refrig. 52 (2015) 21-31.

Bibliografía adicional

Además de los artículos y libros a los que se han hecho referencias explícitas, otra bibliografía interesante sobre los temas tratados puede encontrarse en los siguientes libros y páginas web:

Libros

Jacobson, M. Z. *Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions*. Cambridge University Press, second edition, 2012.

Maina, P; Huan, Z. *A review of carbon dioxide as a refrigerant in refrigeration technology*. South African Journal of Science, Volume 111, Number 9/10, 2015

Páginas web:

Página interactiva donde se simula el efecto del cambio climático sobre el planeta: <https://climate.nasa.gov/interactives/climate-time-machine>

Usos del CO₂

<http://esmateria.com/2014/05/31/10-cosas-que-hacer-con-el-co2-en-vez-de-tirarlo-la-atmosfera/#comments>

<https://www.netl.doe.gov/research/coal/carbon-storage/research-and-development/co2-utilization>

Recopilación histórica de los científicos e ingenieros que han marcado hitos en el conocimiento y aplicaciones del CO₂ desde los inicios hasta principios del siglo XX.



*Edgar Fahs Smith Collection,
University of Pennsylvania
Library*

Paracelsus (1493-1541), médico, alquimista y astrólogo suizo. Nacido Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim.

Paracelso fue uno de los primeros profesores de medicina en reconocer que los médicos requerían un sólido conocimiento académico en las ciencias naturales, especialmente en la química. Fue pionero en el uso de productos químicos y minerales en la medicina.

Fue el primero en distinguir entre el aire y el CO₂

<http://www.eurammon.com/node/306>

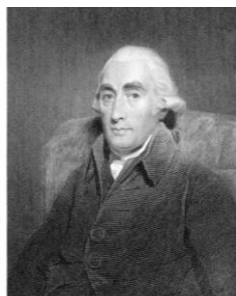


Wikipedia (Agosto 2017)

Jan Baptiste van Helmont (1580-1644), químico, físico, alquimista, médico, y fisiólogo flamenco.

En parte, es conocido por sus experimentos sobre el crecimiento de las plantas, que reconocieron la existencia de gases discretos. Identificó los compuestos químicos que hoy llamamos dióxido de carbono y óxido de nitrógeno; fue el primer científico que diferenció entre los conceptos de gas y aire, y el que introdujo la palabra "gas" (del latín chaos, y este del griego Χάος) en el vocabulario científico.

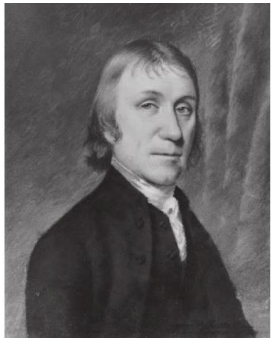


https://es.wikipedia.org/wiki/Jan_Baptista_van_Helmont

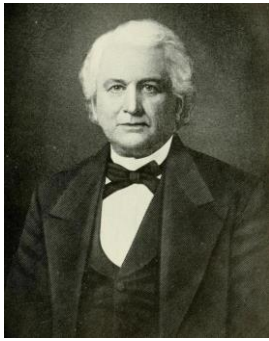


*Edgar Fahs Smith Collection,
University of Pennsylvania
Library*

Joseph Black (1728-1799), médico, físico y químico escocés.

Sus investigaciones más importantes se centraron en el campo de la termodinámica, donde estableció una clara distinción entre temperatura y calor, e introdujo conceptos como el calor específico y el calor latente de cambio de estado. Fue la primera persona en aislar el dióxido de carbono en estado puro, evidenciando que el aire no era un elemento simple, sino que está compuesto por varios elementos diferentes.

	<p>https://es.wikipedia.org/wiki/Joseph_Black</p>
 <p><i>Edgar Fahs Smith Collection, University of Pennsylvania Library</i></p>	<p>Joseph Priestley (1733-1804), científico y teólogo inglés, clérigo disidente, filósofo, educador y teórico político.</p> <p>Descubridor del agua carbonatada y del oxígeno. Descubridor, asimismo, del poder refrigerante del CO₂ y del amoniaco.</p> <p>Publicó más de 150 obras.</p> <p>https://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Priestley</p>
	<p>Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794), noble y químico francés.</p> <p>Considerado el creador de la química moderna, en 1774 prueba la composición del CO₂ por vía sintética. Acuñó la palabra "acide carbonique" (traducida como ácido carbónico) al detectar que el gas tenía una composición de una parte de carbono y dos partes de oxígeno. Uno de sus grandes descubrimientos fue el papel que el oxígeno desempeña en la combustión.</p> <p>http://www.eurammon.com/node/306</p>
	<p>Baron Charles Cagniard de la Tour (1777- 1859), científico francés.</p> <p>En 1822 descubrió que para cada líquido existía una determinada temperatura alcanzada la cual el líquido pasaba a estado gaseoso, se aplicara la presión que se aplicara. Por encima de esta temperatura la sustancia se encuentra en fase de fluido supercrítico, y la distinción entre gas y líquido desaparece. Es decir, descubre la presencia del punto crítico de las sustancias, a partir de sus estudios, entre otros, del CO₂.</p> <p>http://physics.lnu.edu.ua/jps/2009/3/pdf/3001-4.pdf</p>



Alexander Catlin Twining (1801 –1884), científico e inventor americano.

Fue el iniciador de la refrigeración comercial, con sus investigaciones para la producción artificial de hielo a gran escala.

https://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Catlin_Twining

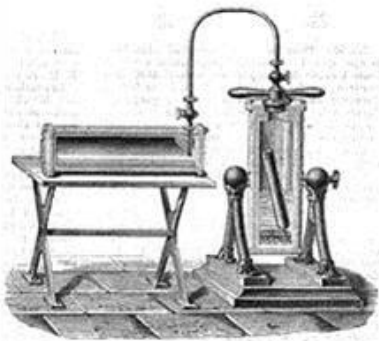
<https://www.britannica.com/biography/Alexander-Catlin-Twining>



Andrew Thomas (1813 - 1885), físico, químico irlandés.

El trabajo más importante llevado a cabo por Andrews se refiere a las técnicas de licuefacción de los gases. Sus estudios, realizados sobre todo con CO₂, le permitieron formular la hipótesis de que para cada gas existe una temperatura crítica por encima de la cual no es posible licuarlo con sólo incrementar la presión a la que se encuentra sometido. Demostró, así mismo, la utilidad de los diagramas de fase.

<http://www.fisicanet.com.ar/biografias/cientificos/a/andrews.php>



Máquina inventada por Thilorier para producir hielo seco (1835)

Adrien-Jean-Pierre Thilorier (1790 –1844), inventor francés.

Descubridor del hielo seco en 1835, descubrimiento a veces mal atribuido a su padre, Jean-Charles Thilorier, quien también era inventor.

Curiosamente, él no era consciente al principio de haber descubierto solidificado CO₂, hecho que le fue puesto de manifiesto por un grupo de científicos de la Academia de Ciencias de Francia a los que presentó el experimento.

https://en.wikipedia.org/wiki/Adrien-Jean-Pierre_Thilorier



Hermann Kolbe (1818 – 1884), científico alemán.

Kolbe postuló que los compuestos orgánicos se podrían derivar de los inorgánicos, directamente o indirectamente, por procesos de sustitución. Comprobó su teoría convirtiendo el disulfuro de carbono, mediante varios pasos, en ácido acético. Introduciendo una idea modificada de radicales estructurales, contribuyó al establecimiento de la teoría estructural. También, predijo la existencia de alcoholes secundarios y terciarios.

Trabajó en la electrólisis de las sales de los ácidos grasos y otros ácidos (electrólisis de Kolbe) y preparó el ácido salicílico a partir de CO_2 , la base para hacer la aspirina en un proceso llamado síntesis de Kolbe o reacción de Kolbe-Schmitt.

http://www.mjphd.net/uploads/2/4/4/0/24404036/english_translation_of_on_the_synthesis_of_salicylic_acid_by_hermann_kolbe.pdf



John Tyndall (1820-1893), físico e ingeniero irlandés.

Conocido, fundamentalmente, por sus estudios sobre los coloides y microbiología.

Fue el primero en experimentar con las propiedades de absorción de gases con el fin de probar que los gases de la atmosfera terrestre absorben distinta cantidad de radiación infrarroja, lo que hoy conocemos como gases de efecto invernadero.

<https://www.biografiasyvidas.com/biografia/t/tyndall.htm>



Svante August Arrhenius (1859-1927), físico y químico sueco. Nobel de Química 1903.

Conocido por la teoría de disoluciones electrolíticas. Fue uno de los fundadores de la físico-química.

Fue el primero el relacionar el calentamiento global con las emisiones de gases de efecto invernadero, y, en concreto, con el CO_2 .

https://en.wikipedia.org/wiki/Svante_Arrhenius

Los descubridores de la relación entre el agujero de la capa de ozono, las emisiones de compuestos CFC y su relación con el cambio climático.

Los científicos Mario Molina, Frank Sherwood Rowland y Paul Jozef Crutzen fueron los descubridores de la causa del agujero de la capa de ozono de la Antártida, estableciendo la relación entre el agujero de la capa de ozono y los compuestos clorados y bromados, descubriendo las reacciones químicas que las provocaban. Sus hallazgos fueron la base científica sobre la que se asentó el Protocolo de Montreal. Estas investigaciones les valieron, de manera compartida, el Premio Nobel de Química en 1995.



José Mario Molina Pasquel y Henríquez (1943-). Conocido como Mario Molina. Ingeniero químico mexicano.

Nobel de Química en 1995 (compartido con Paul J. Crutzen y F. Sherwood Rowland)

Doctor en físico-química por la Universidad de Berkeley. En la actualidad es profesor de la Universidad de California en San Diego.

https://es.wikipedia.org/wiki/Mario_Molina



Frank Sherwood Rowland (1927-2012) Químico estadounidense.

Nobel de Química en 1995 (compartido con Paul J. Crutzen y Mario Molina)

Doctor en química (1952) por la Universidad de Chicago. Fue profesor de química en la Universidad de California, Irvine.

https://en.wikipedia.org/wiki/F._Sherwood_Rowland



Paul Jozef Crutzen (1933-). Ingeniero holandés, doctor en Meteorología.

Nobel de Química en 1995 (compartido con Mario Molina y F. Sherwood Rowland)

Desde 1980 es miembro de la Sociedad Max Planck para el avance de la ciencia y Director de la División de química atmosférica del Instituto Max-Planck, en Maguncia Alemania y desde 1983 director ejecutivo de esta misma institución.

Acuñó la palabra “antropoceno” en el año 2000.

https://es.wikipedia.org/wiki/Paul_J._Crutzen

**Contestación al discurso de Ingreso en la
Academia de Ciencias de Granada de la
Ilma. Sra. Dña. Lourdes Vega Fernández**

**Excmo. Sr. D. Roque Hidalgo Álvarez
Académico Numerario**

**Excmo. Sr. Presidente de la Academia de Ciencias
Excmos. e Ilmos. miembros de la Academia
Señoras y Señores,**

En primer lugar, me gustaría comenzar esta breve intervención expresándole a todos ustedes mi satisfacción y agradecimiento hacia la Junta de Gobierno de esta Academia por la oportunidad que me concede de contestar, en su nombre, al discurso pronunciado por la profesora Lourdes Vega Fernández en el acto de su ingreso como nueva Académica Correspondiente, así como destacar los aspectos más sobresalientes de su trayectoria vital. Voy a insistir más en este segundo aspecto pues considero que la trayectoria vital de la

nueva Académica Correspondiente es toda una lección de buen hacer y un ejemplo de cómo afrontar nuevos retos tanto científicos como personales.

En estos momentos en que la frivolidad parece invadirlo todo y la cultura del esfuerzo y el sacrificio se presenta como un vestigio reaccionario del pasado, es necesario decir que sólo personas con la fuerza de voluntad e inteligencia que tiene la profesora Lourdes Vega nos permitirán afrontar los retos venideros con garantías de éxito. Reafirmar nuestro convencimiento de que sin ciencia no hay futuro y de que los científicos son imprescindibles en cualquier modelo económico que quiera ser productivo y sostenible a la vez. Constatar, una vez más, que para ser competitivos en el mundo actual antes hay que ser competentes. Es la competencia profesional lo que nos permitirá dejar a las jóvenes generaciones un futuro posible.

La principal área de investigación de Lourdes Vega Fernández es el modelado molecular combinado con técnicas experimentales aplicadas al desarrollo de procesos y productos sostenibles: la calidad del aire, tratamiento de aguas, nuevos materiales y procesos químicos más respetuosos con el medio ambiente. Recientemente ha focalizado su atención en las energías limpias (incluyendo nuevos refrigerantes), la captura y utilización de CO₂, el petróleo y el gas natural, el hidrógeno y las pilas de combustible, los disolventes alternativos tales como los fluidos supercríticos y los líquidos iónicos, la nanotecnología y el tratamiento de aguas; realizando una investigación básica que permite innovar en diversos procesos industriales. Para obtener las propiedades fisicoquímicas de los fluidos utiliza la Termodinámica Estadística como ciencia y la simulación molecular como herramienta. En muchos casos el objetivo es obtener una ecuación de estado eficiente, en otros casos busca describir la densidad, la tensión superficial, la viscosidad o la solubilidad del CO₂ en mezclas líquidas, o la

adsorción selectiva de mezclas de gases y contaminantes, para mejorar el proceso al que se aplican. Con frecuencia el objetivo es el diagrama de fases con especial atención en el punto crítico donde pequeñas fluctuaciones pueden provocar variaciones mayúsculas en las propiedades macroscópicas de los fluidos; trabajando con fluidos reales, que con frecuencia son mezclas de varios fluidos, lo que supone una complejidad considerable. Para ello tenemos que recordar algunas ideas de Termodinámica en el uso de refrigerantes y fijarnos en una zona del diagrama de fases a la que nunca le prestábamos atención, es decir, la que hay por encima del punto crítico.

En el comienzo del discurso se formula una pregunta, “¿Puede usted explicarme cómo combatir el cambio climático y el calentamiento global desde la ciencia? En mi opinión la respuesta que podemos dar ahora es que estamos en mejores condiciones para poder explicarlo.

Ahora conocemos que el dióxido de carbono además de ser un gas de efecto invernadero puede ser, si se dispone de la inteligencia suficiente y la tecnología adecuada, una materia prima en los sectores químico, energético y de materiales.

Tal y como se afirma en el prólogo del libro de Lourdes Vega titulado “El CO₂ como recurso. De la captura a los usos industriales”, “Debe remarcar que no es imprescindible demostrar que el mundo se acabará para poder actuar. No es de recibo la actitud de que si el mundo no se acaba no es preciso hacer nada, y que, sencillamente mientras lo estamos discutiendo, es mejor no actuar. La situación es mucho más sencilla: emitir grandes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera no es bueno, con lo cual si podemos emitir menos estamos mejorando o perjudicando menos nuestro hábitat natural, con los consiguientes efectos beneficiosos sobre el planeta Tierra y su habitabilidad para la especie humana”. Quién así se expresa es el Director General de la Fundación Gas Natural, Pedro Fábregas.

¿Se puede entender la investigación científica como un proceso que comience con la comprensión del problema y finalice con la salida de un producto al mercado?

Una respuesta afirmativa parece deducirse del discurso de Lourdes Vega. Este enfoque del proceso investigador no es frecuente en nuestro país y constituye una de las conclusiones principales del discurso que acabamos de oír. Cuando detrás de la ciencia básica de calidad se esconden aplicaciones industriales, entonces, los límites entre la ciencia y la tecnología parecen difuminarse. Sin embargo, solo los países que tienen un sistema eficiente de transferencia de conocimiento son capaces de desarrollar esas aplicaciones y generar nuevos productos o resolver nuevos problemas. Quienes realizan dicha labor son traductores capaces de ver más allá del valor académico que tiene en nuestro país la investigación científica básica. Un buen ejemplo lo tenemos aquí. La formación interdisciplinar de Lourdes Vega le permite ir más allá del simple placer que produce encontrar la solución a un problema mediante la investigación básica.

¿Cómo ha logrado esa formación nuestra nueva Académica Correspondiente?

Lourdes Vega Fernández nació en 1965 en Villanueva del Fresno (Badajoz), siendo la séptima de nueve hermanos. Se crio en ese pueblo hasta que se marchó a Badajoz donde cursó el BUP en el instituto “Bárbara de Braganza”. Como un día afirmara Max Aub, “uno es de donde hace el bachillerato” y es un hecho probado que las élites dirigentes de las sociedades modernas se forjan en la enseñanza secundaria.

En segundo de BUP tuvo un profesor de física, Paco Pepe, que claramente marcó su futuro profesional: desde entonces tiene pasión no sólo por la física, sino por entender el porqué de las cosas.

En 2010 Lourdes Vega Fernández es elegida una de las dieciséis Mujeres Científicas Catalanas de Excelencia para la exhibición itinerante de Mujeres en Ciencia, organizada por la Asociación Catalana de Comunicación Científica.

Desde Badajoz se fue sola a Sevilla con 17 años a estudiar COU, para que le resultara más fácil entrar en la Facultad de Físicas de la Universidad de Sevilla. Su padre no quería que se fuera, pero la dejó ir bajo dos condiciones de contorno: "que no tenga ninguna queja de ti" y "no dejes de hacer alguna cosa solo porque te parezca difícil". A su madre, otra mente inquieta, sus abuelos no la dejaron estudiar una carrera universitaria ("ni tan pobre como para no poder vivir con lo que tenemos, ni tan rica como para tirar el dinero", le dijo su abuelo cuando ella se empeñó en seguir estudiando). Lourdes Vega Fernández costeó sus estudios gracias a una beca concedida por el Ministerio de Educación y Ciencia y con las clases particulares que daba para mantenerse, como tantos hacíamos en aquella época.

En 2016 es nombrada "Professor and Joint Chair" en el "Gas Research Center" del "Petroleum Institute" de la "Abu Dhabi National Oil Company" (ADNOC) en los Emiratos Árabes Unidos. Sí, han oído ustedes bien: es un centro para investigar sobre gases.

Durante los estudios del BUP decide estudiar francés, en lugar de inglés, como segunda lengua. En su pueblo la única opción era francés, pero en el Instituto podía haber escogido inglés. No obstante, pensó que el inglés ya lo aprendería algún día y prefirió seguir con el francés.

En 1990, en el segundo año de tesis se marcha al Departamento of Ingeniería Química de la “University of Southern California” para acabar su doctorado en Estados Unidos. Entonces Lourdes Vega Fernández no hablaba inglés.

Al acabar el doctorado (defendido en la Universidad de Sevilla en septiembre de 1992) se le presentó una nueva encrucijada: quedarse en Sevilla con una plaza de asociado que se convertiría en ayudante, o irse de postdoc a la Universidad de Cornell a trabajar con los simuladores de primera línea. Eligió esta segunda opción. Se incorporó a la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Cornell, en Ithaca, en octubre de 1992.

Año 2011, Lourdes Vega es nombrada Comisaria Científica del Smart Future Minds Award, premio que formaba parte de la exhibición “Ciudades inteligentes”, celebrada en Barcelona sobre ideas orientadas al futuro para la sostenibilidad de las ciudades y organizada por Mercedes Benz en diferentes ciudades europeas.

Durante su estancia en Cornell, en 1994, un estudiante de ingeniería química en Tarragona, le informa de que en la recién creada Universitat Rovira i Virgili estaban buscando investigadores formados en otros países para incorporarlos como profesores de Ingeniería Química. Le ofrecen financiación para crear un grupo de investigación y una plaza de Profesora de Titular Interina que acepta. Organiza el primer grupo español de Termodinámica Molecular en Ingeniería. Las voces agoreras, tan frecuentes en nuestras Universidades, le aseguraron que un grupo así estaba condenado al fracaso.

Desde junio de 2016 Lourdes Vega es miembro del consejo de administración de la empresa Ercros, presidenta de la comisión de nombramientos y remuneración y vocal de la comisión de auditoría.

Según se informa en el portal de Ercros, Lourdes Vega tiene la categoría de Consejera Independiente y no posee acciones de la compañía.

Ercros es la primera empresa de química básica española con una tradición centenaria diversificada en tres áreas de actividad: División de Derivados del Cloro, División de Química Intermedia y División de Farmacia. Exporta casi la mitad de sus ventas a más de 128 países.

Volvamos a la trayectoria vital de nuestra nueva Académica Correspondiente.

Estando en Tarragona, en 2001, la invitan a dar unas clases en una escuela europea sobre Fluidos Supercríticos, que tenía lugar en Barcelona, en el Instituto de Ciencia de Materiales del CSIC. Al acabar, el director del instituto, Carles Miravittles, le comenta que le había gustado mucho lo que ella hacía, y que el director de I+D de una empresa (Carbuos Metálicos) presente en la conferencia opinaba que la modelización molecular de los fluidos supercríticos tenía un gran potencial de aplicación a la industria. Le proponen comenzar una línea de investigación de ese tipo en el CSIC en Barcelona, donde la mayoría de la investigación que se hacía era, o bien ciencia fundamental o puramente aplicada, sin nada que fuera fundamental para la aplicación industrial, y menos aún a nivel teórico.

Aprobó la oposición en diciembre de 2002 y en mayo de 2003 se incorpora al CSIC. Continuó dando clases de doctorado en Tarragona como profesora invitada del programa de doctorado y comenzó un primer proyecto de colaboración con Carbuos Metálicos (Air Products) en el marco de algo que

comenzaba a nacer y que se llamaría MATGAS. MATGAS era un consorcio formado por Carburos Metálicos (Air Products) con el CSIC y la Universitat Autònoma de Barcelona. El socio mayoritario era Carburos Metálicos (Air Products).

Una vez instalada en el Instituto de Ciencia de Materiales del CSIC en Barcelona, con un grupo consolidado, buenas relaciones dentro y fuera del Instituto, colaboraciones internacionales y varios proyectos en curso, le llega una invitación desde MATGAS para dar una charla de 5 minutos en una serie de actos que se hacían con motivo de la inauguración en Barcelona de las instalaciones de este consorcio en 2005. Ese mismo día recibe una propuesta de trabajo de Air Products para realizar investigación dentro de esta multinacional de matriz norteamericana.

Ya estaba colaborando en la realización de un proyecto conjunto que tenía por objeto comprender, mediante el modelado molecular, las propiedades de surfactantes disueltos en dióxido de carbono supercrítico.

Tras una breve estancia en el verano de 2006 en Allentown (donde está la sede central de la compañía) le proponen incorporarse a Air Products y ser la directora de MATGAS, redefiniendo su estrategia, modo de operar, proyectos y líneas de investigación, así como la contratación de personal investigador para llevarlo a cabo.

En 2007 acepta la propuesta y renuncia a su segunda plaza de funcionaria, dando el salto a la empresa privada. Es el cambio más grande que ha hecho en su vida profesional. Se percata de que hacer investigación en la empresa privada es apasionante, pero tiene una serie de condicionantes: el mayor es la escala de tiempos (todo es mucho más rápido) y además todo pierde su importancia frente a lo que interesa a la compañía.

Aprendió a ser flexible, a programar los tiempos y a cuestionar de vez en cuando lo que se hacía, pero también a trabajar de modo incansable para poder hacer investigación de nivel, y seguir publicando, mientras desarrollaba también la gestión típica de un director. Aprendió a hacer planes estratégicos, a llevar la contabilidad, a tratar temas de seguridad, a realizar la gestión de personal, a trabajar por objetivos, a patentar, etc.

Pensando en grande y, ya dentro de MATGAS, Lourdes Vega organiza un consorcio público-privado de grupos de investigación que desarrolló el proyecto CENIT SOST-CO₂, que supuso un salto de calidad tanto para MATGAS como para la empresa Carbueros Metálicos (Air Products).

Continuó creciendo como investigadora y pasó a dirigir a nivel global la investigación y el desarrollo de nuevos productos en CO₂, alimentación y tratamiento de aguas. La experiencia en MATGAS finalizó en 2015, el mismo día que recibía de manos del Presidente de la Generalitat, el premio concedido a MATGAS por ser el mejor Consorcio Público-Privado en Cataluña, así como por los logros conseguidos en los últimos años entre los que había 5 nuevos productos en el mercado.

En el año 2005, el profesor Nathan Rosenberg, de la Universidad de Stanford, declaraba en una entrevista realizada en Madrid lo siguiente, “la educación superior es lo más importante. Para que un país desarrolle tecnologías complejas, necesita personas con capacidades complejas”. Más aún: ese mismo profesor afirmaba “España va a sufrir mucho si no empieza a innovar”. Pero, ¿qué significa innovar? Según el profesor Jesús Peña Cedillo, de la Universidad Simón Bolívar, “innovar es producir y poner en práctica con incidencia social y/o económica nuevo conocimiento; por tanto,

se trata de la capacidad para generar y aplicar conocimiento que incremente la productividad, la eficiencia o la efectividad de una comunidad u organización, permitiéndole alcanzar sus objetivos o incrementar su bienestar. El concepto se refiere tanto a las usualmente reconocidas como “innovaciones tecnológicas”, como a aquellas otras de índole social e institucional, todas representando diversas formas de generación y uso del conocimiento”. La innovación es por necesidad un hecho socioeconómico que tiene como paso previo el de la investigación que es la creación de alguna idea científica, o teoría o concepto o artefacto, que en sí mismo puede no producir ningún efecto socioeconómico importante.

El siguiente paso que nuestra Académica Correspondiente dio fue montar una “startup” para poner en valor todo lo que había aprendido esos años, siguiendo con la I+D y ayudando a otras empresas, sobre todo pymes, a hacer I+D y a buscar financiación para dichos fines. Una “startup” es una empresa emprendedora que es típicamente un negocio de reciente creación, de rápido crecimiento que tiene como objetivo satisfacer una necesidad de mercado mediante el desarrollo de un modelo de negocio viable en torno a un producto innovador, un servicio, un proceso o una plataforma.

Contando con otros tres socios realizó un plan de negocio y, en noviembre de 2015, registraron oficialmente a Alya Technology & Innovation SL, (AlyaTech). AlyaTech es una empresa de base tecnológica centrada en la sostenibilidad y el medio ambiente. Trabajan con sus clientes para incrementar sus cifras de negocio y llegar a mercados emergentes con productos sostenibles; al mismo tiempo que buscan oportunidades de financiación externa para estos desarrollos.

Como ha quedado de manifiesto con anterioridad Lourdes Vega trabaja en la actualidad en el Instituto del Petróleo (PI) de Abu Dhabi. Allí continúa con la investigación que había llevado a cabo años atrás. Ha montado un grupo y allí está formando a jóvenes investigadores e investigadoras, dirige proyectos con empresas internacionales y aporta prestigio a la institución. Aunque le prometieron que tendría una carga docente baja, en este último semestre ha dado clases a 104 estudiantes de segundo curso de carrera.

Cabe concluir que, hasta ahora, nuestra nueva Académica Correspondiente ha cumplido la recomendación que le hizo su padre, "no dejes de hacer alguna cosa solo porque te parezca difícil".

Lourdes Vega Fernández está casada con Jordi desde 1993 y tiene dos hijas, Anna y Marta, y un hijo, David.

Después de todo lo dicho espero haber puesto de manifiesto todas las cualidades que nuestra nueva Académica Correspondiente posee, en la certeza de que su incorporación incrementará el prestigio de la Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada.

Muchas gracias por su atención.

He dicho.

