

**BBVA**

# Innovación y cambio climático

Edward S. Rubin  
Carnegie Mellon University

## INTRODUCCIÓN

En gran medida, el estudio de la innovación y el cambio tecnológico ha estado motivado por el deseo de comprender y modelar las fuerzas que subyacen tras el desarrollo económico y la competitividad en una economía de mercado. Hay, pues, una extensa literatura, firmada principalmente por científicos sociales, en la que se examinan las numerosas facetas de la innovación y los factores que contribuyen a ella, desde el comportamiento de los individuos y las organizaciones a la función y la eficacia de las políticas gubernamentales dirigidas a estimular la innovación en sectores concretos de la economía o en áreas definidas de la tecnología como la informática, la aeronáutica o la agricultura.

El papel desempeñado por la innovación tecnológica en la resolución de algunos problemas de la sociedad como la contaminación del aire y el agua es un avance más reciente. A diferencia de lo que ocurre con las innovaciones que se dan en sectores como el farmacéutico o el electrónico, cuyo resultado son nuevos productos deseados por los consumidores (como medicinas, teléfonos móviles y servicios de Internet más eficaces o económicos), el mercado *natural* existente para la mayoría de las tecnologías medioambientales cuya función es reducir o eliminar la emisión de sustancias

contaminantes al medio ambiente es limitado o nulo. ¿Pagaría voluntariamente 1.000 dólares adicionales para instalar controles de emisión de contaminación al aire en su automóvil si la decisión dependiera de usted? La mayoría no lo haría, consciente de que su acción aislada serviría de poco para resolver el problema de la contaminación atmosférica, a menos que se exigiera a todos los conductores que adoptaran la misma medida.

En casos como este, el papel de las políticas y las regulaciones gubernamentales resulta crucial, ya que los problemas medioambientales, en su mayoría, requieren una acción colectiva para encontrar una solución eficaz. Asimismo, la naturaleza y el alcance de las innovaciones que reducen el coste o mejoran la eficiencia de los controles medioambientales dependen en buena medida de las acciones de los organismos gubernamentales en todos los niveles.

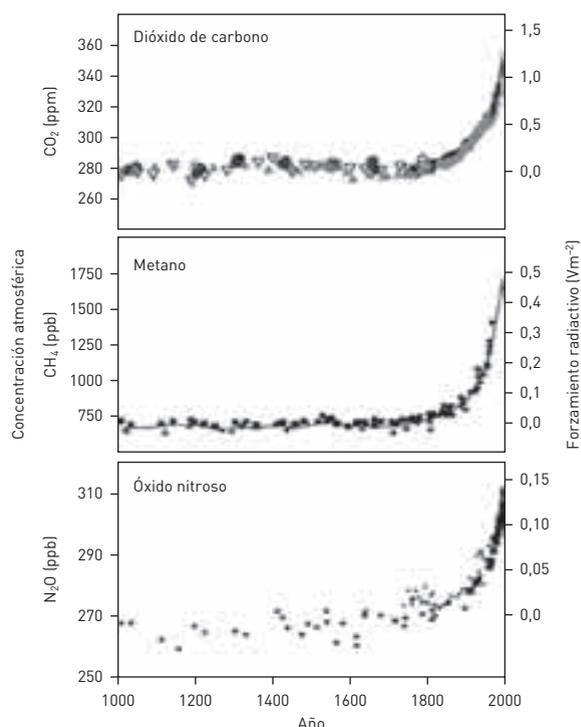
En este ensayo, nos centraremos en los vínculos existentes entre la innovación tecnológica y el cambio climático global, probablemente el desafío medioambiental de mayor alcance y envergadura al que el mundo se enfrenta en la actualidad. Ofreceremos en primer lugar una breve descripción del problema del cambio climático y de las necesidades de innovación que han motivado este artículo. A continuación, se

examinarán con mayor detenimiento algunas de las opciones disponibles para acelerar las innovaciones que permitirán hacer frente al desafío del cambio climático. Aunque muchos de los ejemplos citados en este texto proceden de experiencias y estudios vinculados a Estados Unidos, los conceptos y las estrategias generales que se analizan son en su mayor parte extrapolables a todas las naciones que se enfrentan al reto de mitigar el cambio climático.

### EL PROBLEMA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

A lo largo de los últimos ciento cincuenta años, se han producido aumentos importantes en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, especialmente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (véase el gráfico 1), así como de un grupo de GEI industriales entre los que se incluyen los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Los gases de efecto invernadero aceleran el cambio climático porque atrapan el calor en la atmósfera, con lo que se produce un aumento de la temperatura media del planeta. Esto, a su vez, modifica los patrones y la intensidad de las precipitaciones, los flujos de aire y las corrientes marítimas del globo, todo lo cual se traduce directa o indirectamente en una alteración del clima (definido como el tiempo atmosférico promedio de una región en un periodo de varias décadas).

**Gráfico 1.** Tendencia histórica de la concentración atmosférica de los principales GEI



Fuente: IPCC, 2007a.

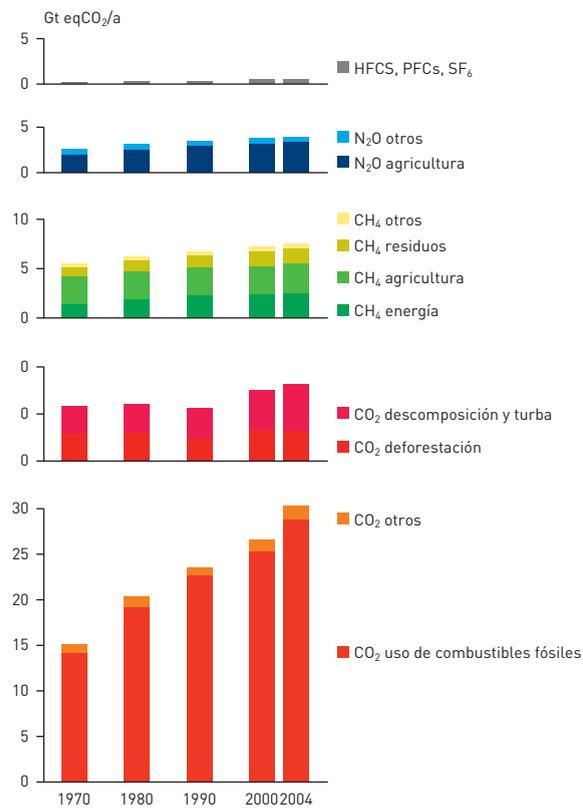
Las principales fuentes del incremento de GEI en la atmósfera son las emisiones de GEI generadas por diversas actividades humanas (cuadro 1). El gráfico 2 muestra el crecimiento reciente de las emisiones globales de GEI expresado en términos de toneladas «equivalentes de CO<sub>2</sub>», un concepto que explica las diferencias en la capacidad para atrapar el calor de distintos

**Cuadro 1.** Principales gases de efecto invernadero y fuentes comunes de emisiones

Símbolo	Nombre	Fuentes comunes
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	Combustión de combustibles fósiles, tala de bosques, producción de cemento, etc.
CH <sub>4</sub>	Metano	Vertederos, producción y distribución de gas natural y petróleo, fermentación procedente del sistema digestivo del ganado, cultivo de arroz, combustión de combustibles fósiles, etc.
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso	Combustión de combustibles fósiles, fertilizantes, producción de nailon, estiércol, etc.
HFC's	Hidrofluorocarbonos	Gases refrigerantes, fundición de aluminio, fabricación de semiconductores, etc.
PFC's	Perfluorocarbonos	Producción de aluminio, industria de semiconductores, etc.
SF <sub>6</sub>	Hexafluoruro de azufre	Sistemas de transmisión y distribución eléctrica; disyuntores, producción de magnesio, etc.

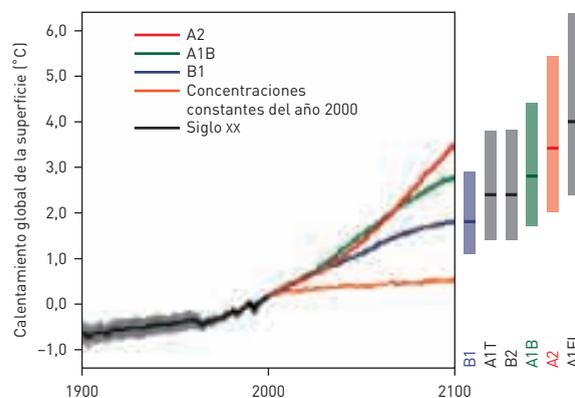
Fuente: IPCC 2007b.

**Gráfico 2.** Crecimiento reciente de las emisiones globales de gases de efecto invernadero



Fuente: IPCC, 2007b.

**Gráfico 3.** Tendencia histórica y escenarios futuros del calentamiento global desde 1900 a 2100. Los rangos mostrados a la derecha corresponden a los seis escenarios (con las etiquetas B1 a A1F1) previstos por los modelos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)



Fuente: IPCC, 2007b.

gases con respecto al dióxido de carbono (véase IPCC 2007 para obtener información detallada). La mayor contribución es la del CO<sub>2</sub> procedente de la combustión de los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural, compuestos principalmente por carbono e hidrógeno). Dado que nuestro uso de la energía también libera algunos GEI distintos del CO<sub>2</sub> (sobre todo CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O), el consumo energético es responsable de cerca del 85% de todas las emisiones de GEI.

La esencia del problema del cambio climático es que si las tendencias actuales continúan, las emisiones globales futuras de gases de efecto invernadero experimentarán en las décadas venideras un importante aumento como resultado del crecimiento de la población mundial, el desarrollo económico y otros factores que incrementan las emisiones de GEI. Como consecuencia, las proyecciones anticipan una subida de la temperatura global media de entre 1,1 °C y 6,4 °C al final de este siglo (IPCC, 2007). Aunque hay un grado considerable de incertidumbre en esas proyecciones (como se evidencia en el gráfico 3), los efectos potenciales del calentamiento global podrían amenazar gravemente la salud humana, las reservas de agua, la agricultura y los asentamientos humanos, especialmente en las áreas costeras vulnerables al aumento del nivel del mar y las tormentas (IPCC, 2007b; NRC, 2010b).

A la vista de este alto grado de incertidumbre, ¿por qué no nos limitamos a esperar hasta que contemos con evidencias empíricas más sólidas de la magnitud y los efectos del cambio climático? Una diferencia fundamental entre los gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos *convencionales* como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y las partículas es que los GEI, una vez emitidos, permanecen en la atmósfera durante periodos de tiempo muy largos, que suelen ir de décadas a milenios. Por ejemplo, aproximadamente la mitad del CO<sub>2</sub> emitido actualmente se mantendrá en la atmósfera dentro de un siglo y seguirá contribuyendo al calentamiento global. Y siglos más tarde, parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> de nuestros días aún estarán

presentes en el aire. En cambio, contaminantes convencionales como el  $\text{SO}_2$  permanecen en la atmósfera durante periodos de tiempo relativamente cortos —por lo general días o semanas— antes de que diversos procesos físicos y químicos los eliminen o los limpien. Por tanto, si redujéramos rápidamente las emisiones de los contaminantes convencionales, sus concentraciones atmosféricas (y los efectos derivados de ellas) también disminuirían con rapidez. No ocurre lo mismo con los GEI. A causa de su gran longevidad, las concentraciones atmosféricas seguirían aumentando a menos que las emisiones se restringieran drásticamente. Pensemos, a modo de ejemplo, en una bañera que recibe agua de un grifo de gran caudal mientras que en el fondo hay un sumidero por el que solo escapa lentamente un hilillo de agua: el nivel de agua seguiría aumentando a menos que el grifo se cerrara casi por completo y el caudal entrante se igualara con el que se desagua poco a poco. Por tanto, si los efectos del cambio climático resultan ser tan graves como se ha proyectado, limitar las emisiones de GEI en el futuro serviría de poco para reducir las concentraciones atmosféricas con rapidez y mitigar esos efectos perniciosos.

### ¿QUÉ MEDIDAS SE DEBEN ADOPTAR?

Los objetivos políticos internacionales para el cambio climático global se establecieron en 1992 bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Hasta la fecha, 192 naciones han suscrito el objetivo de la CMNUCC de «estabilizar las concentraciones de gas de efecto invernadero de la atmósfera en un nivel que impida una interferencia antropogénica peligrosa con el sistema climático». La investigación científica lleva tiempo tratando de conocer mejor y cuantificar los vínculos existentes entre las actividades humanas, las emisiones de GEI, los incrementos resultantes de la concentración atmosférica, los cambios derivados que se han registrado en la temperatura global y el impacto de esos cambios (cuadro 2). Las

**Cuadro 2.** Vínculos fundamentales entre las actividades humanas y el cambio climático global



mayores incertidumbres residen en los vínculos entre los incrementos de la temperatura global y los efectos resultantes. Sin embargo, apoyándose en la ciencia actual, son muchos los responsables del desarrollo de políticas de todo el mundo que recomiendan un aumento de no más de 2 °C en la temperatura global a largo plazo como objetivo que las políticas climáticas deben establecer para prevenir efectos peligrosos. Para alcanzar este objetivo es necesario adoptar medidas que establezcan las concentraciones atmosféricas de GEI en niveles que apenas sobrepasen los actuales. Para ello sería necesario que en 2050 se hubiera logrado reducir las emisiones de GEI globales anuales entre un 50 y un 80% con respecto a los niveles de 1990, según los estudios recientes (IPCC, 2007b).

Las implicaciones y los desafíos tecnológicos de este objetivo son formidables. La situación se ilustra en el gráfico 4, que muestra los resultados de los modelos diseñados recientemente para Estados Unidos. Estos resultados indican que no existe una solución o ruta única para obtener grandes reducciones en las emisiones de GEI. Los distintos modelos proponen diferentes soluciones basadas en diversas suposiciones sobre la disponibilidad y el coste futuros de las tecnologías alternativas y otros factores. Lo que todos los modelos subrayan, no obstante, es que será necesario introducir cambios radicales en el sistema energético, ya que la suya es la principal contribución al cambio climático.

Hoy en día, cerca del 85% de la energía mundial procede de los combustibles fósiles. De esa cifra, aproximadamente la mitad viene del petróleo (usado sobre todo para el transporte), seguida por cantidades similares de carbón (empleado

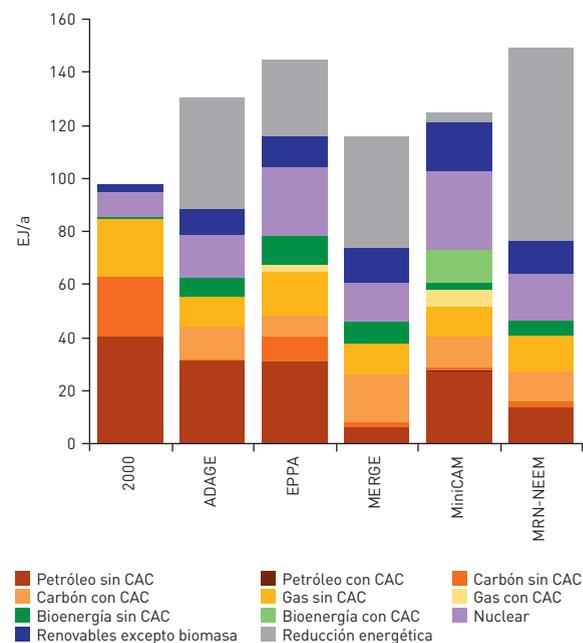
principalmente para generar electricidad) y de gas natural (que se usa en diversas aplicaciones de calefacción doméstica e industrial y cada vez más para la generación de energía eléctrica). El CO<sub>2</sub> liberado por el uso de estos combustibles —procedente sobre todo de las centrales eléctricas y los automóviles— es la fuente fundamental de emisiones de GEI. Realizar una transición a un sistema energético con un bajo (o mejor, nulo) consumo de carbono que sea sostenible es el mayor desafío al que nos enfrentamos si queremos evitar un cambio climático potencialmente peligroso.

### LA NECESIDAD DE CAMBIO TECNOLÓGICO

Será necesario un cambio tecnológico a gran escala para lograr reducciones sustanciales en las emisiones globales de GEI. Los resultados del gráfico 4 ilustran las cuatro estrategias generales disponibles para transformar el sistema energético de un país o una región: 1. reducir la demanda energética en los sectores más importantes de la economía (edificios, transporte e industria) con el fin de recortar la demanda de combustibles fósiles; 2. mejorar la eficiencia de la utilización de la energía de modo que disminuya la cantidad de combustible fósil necesaria para satisfacer la demanda de energía de los *usuarios finales*, lo que se traducirá en una bajada de las emisiones de CO<sub>2</sub>; 3. reemplazar los combustibles fósiles con un alto contenido de carbono, como el carbón y el petróleo, por alternativas con un porcentaje de carbono menor o nulo, como el gas natural, la energía nuclear y fuentes de energía renovables como la biomasa, la eólica y la solar y 4. capturar y aislar el CO<sub>2</sub> emitido en la utilización de combustibles fósiles para impedir su liberación a la atmósfera.

Como se indica en el escenario del gráfico 4 (una reducción del 80% con respecto a las emisiones de 1990 en 2050), las cuatro estrategias son necesarias para reducir las emisiones con el menor coste. A las reducciones de la demanda energética, que incluye los efectos de la mejora de la eficiencia, corresponde el papel más

**Gráfico 4.** Resultados de cinco modelos que muestran la combinación energética de menor coste en Estados Unidos en 2050 para un escenario de regulaciones en el que se exige una reducción del 80% con respecto a los niveles de 1990 en las emisiones de GEI. Se muestra como referencia el uso energético real en el año 2000. [Nota: CAC = captura y almacenamiento de carbono.]



Fuente: adaptado de Fawcett et al., 2009.

destacado en cuatro de los cinco modelos mostrados. La combustión incontrolada de carbón se elimina o se reduce drásticamente en todos los casos, y el uso directo de petróleo y gas natural también disminuye con respecto al caso de referencia del año 2000. En cambio, el uso de energía nuclear y de alternativas renovables como la biomasa y otras fuentes (en especial la energía eólica) aumenta considerablemente en estos estudios. También lo hace la captura y el almacenamiento de carbono (CAC). Esta tecnología podría posibilitar la captura del CO<sub>2</sub> de las centrales eléctricas y otras grandes fuentes industriales y su aislamiento en formaciones geológicas profundas o en yacimientos agotados de petróleo y gas. En el contexto internacional, esta opción ha ganado protagonismo en los últimos años, y ya se han puesto en marcha iniciativas

destinadas a desarrollar y demostrar la viabilidad de la CAC para atenuar el cambio climático.

Los mismos tipos de transformaciones del sistema energético que se ilustran en el gráfico 4 para Estados Unidos se desprenden de otros modelos ideados a nivel mundial (IPCC 2007b; Clark *et al.*, 2009). Aunque el consumo energético representa la mayor contribución a las emisiones de GEI, también será necesario un cambio tecnológico en otros sectores para encontrar soluciones eficaces al cambio climático. Por ejemplo, tendrán que producirse cambios en el uso del suelo, especialmente en lo que respecta a la deforestación, para reducir o prevenir la liberación de CO<sub>2</sub> de *sumideros* naturales como los bosques y la tierra de cultivo. El cambio tecnológico también puede reducir o evitar las emisiones de GEI distintos del CO<sub>2</sub>, como los PFC procedentes de la industria de los semiconductores o las emisiones de óxido nitroso del sector agrícola. En conjunto, es indudable que se requerirá algún tipo de adaptación al cambio climático, y esas adaptaciones exigirán cierto grado de cambio tecnológico (NRC, 2010c).

En resumen, el desarrollo de nuevas tecnologías y su adopción son componentes esenciales de cualquier respuesta integral al cambio climático global. Pero un cambio tecnológico de la escala requerida no puede darse de la noche a la mañana. Para obtener una reducción sustancial de las emisiones de CO<sub>2</sub>, como la reflejada en el gráfico 4, por ejemplo, solo en Estados Unidos sería necesario adaptar o reemplazar cientos de centrales eléctricas, decenas de millones de vehículos y cientos de millones de electrodomésticos, sistemas de construcción (de calefacción, refrigeración e iluminación) y procesos y equipos industriales. Un cambio de esta escala tardará muchas décadas en producirse.

Muchas de las tecnologías necesarias aún no existen comercialmente o resultan demasiado caras (las alternativas a los coches de gasolina son un buen ejemplo). Algunas alternativas, como las tecnologías de captura y aislamiento del carbono para las centrales eléctricas, aún

“El desarrollo de nuevas tecnologías y su adopción son componentes esenciales de cualquier respuesta integral al cambio climático global”

tienen que lograr una aceptación política y social generalizada. Dado que las tasas de desarrollo y adopción de nuevas tecnologías responden en la misma medida a políticas gubernamentales y a fuerzas de mercado como los precios de la energía, debemos analizar con más detenimiento los procesos de cambio tecnológico e innovación y los factores que influyen en ellos.

#### EL PROCESO DE CAMBIO TECNOLÓGICO

Como ya se ha analizado en otras fuentes (NRC, 2010a), el proceso general de cambio tecnológico se caracteriza por tener múltiples pasos o fases. En la literatura se recurre a diversos términos para describir estas fases, pero las cuatro siguientes se encuentran entre las más comunes:

*Invencción:* descubrimiento, creación de nuevos conocimientos o nuevos prototipos.

*Innovación:* creación de procesos o productos comerciales nuevos o mejorados.

*Adopción:* implantación y uso inicial de la nueva tecnología.

*Difusión:* adopción y uso generalizados de la tecnología.

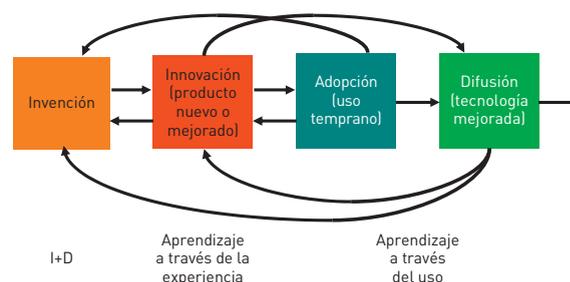
La primera fase —invencción— se apoya en buena medida (aunque no exclusivamente) en la investigación y el desarrollo (I+D), lo que incluye la investigación básica y la aplicada. El término que da nombre a la segunda fase —innovación— se usa a menudo en el ámbito coloquial para describir el proceso global de cambio

tecnológico. En este contexto, sin embargo, se refiere únicamente a la creación de un producto o un proceso ofrecido comercialmente. No significa que el producto se vaya a adoptar ni que su uso llegue a extenderse. Eso solo sucede si el producto supera con éxito las dos últimas fases —adopción y difusión—, que reflejan el éxito comercial de una innovación tecnológica. Estas dos fases son, lógicamente, las más críticas para lograr la reducción de las emisiones de GEI a través del cambio tecnológico.

Los estudios también muestran que, lejos de tratarse de un proceso lineal sencillo en el que cada etapa sucede a la anterior, las cuatro fases del cambio tecnológico son muy interactivas, como se refleja en el cuadro 3. De este modo, la innovación no solo se estimula a través de las iniciativas de I+D, sino también por medio de la experiencia de los pioneros en su adopción, sumada a los conocimientos adquiridos a medida que una tecnología se va extendiendo en el mercado. Así, el *aprendizaje a través de la experiencia* (optimización en la fabricación de un producto) y el *aprendizaje a través del uso* (optimización en la utilización de un producto) son con frecuencia, aunque no siempre, elementos esenciales que permiten la adopción y la difusión de las nuevas tecnologías. Combinadas con un sistema continuo de I+D (a veces denominado *aprendizaje a través de la investigación*), estas fases contribuyen en muchos casos a mejorar el rendimiento y reducir el coste de una nueva tecnología, tendencias que normalmente se describen y se representan como una *curva de aprendizaje* o *curva de experiencia* (IEA 2000; McDonald y Schrattenholzer, 2002).

Cada fase del proceso exige además distintos tipos de incentivos para impulsar el objetivo global del cambio tecnológico. Un incentivo que funciona bien en una fase del proceso podría tener una eficacia nula —o ser incluso contraproducente— en otra. El cambio a gran escala se debe ver y considerar también desde la perspectiva de los *sistemas*, ya que el éxito de cualquier nueva tecnología depende a menudo de otros factores tecnológicos y no tecnológicos. Por ejemplo, la

**Cuadro 3.** Fases del cambio tecnológico e interacciones existentes entre ellas



Fuente: Rubin, 2005.

difusión de las tecnologías de ahorro energético que permiten ajustar automáticamente algunos electrodomésticos como el aire acondicionado y los calentadores de agua puede depender del desarrollo y la generalización de tecnologías de redes eléctricas inteligentes (*smart grids*). Asimismo, la difusión de los aparatos eficientes desde el punto de vista energético puede verse frenada por diversos acuerdos institucionales, como las relaciones entre propietario e inquilino en las que ninguna de las partes tiene incentivos para comprar un aparato más caro aunque ofrezca una mayor eficiencia energética. Así pues, además de las consideraciones técnicas, la adopción y la difusión generalizadas de una nueva tecnología pueden requerir medidas para derribar las fronteras sociales e institucionales que afectan a la naturaleza y al ritmo del cambio tecnológico.

### IMPORTANCIA DE LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

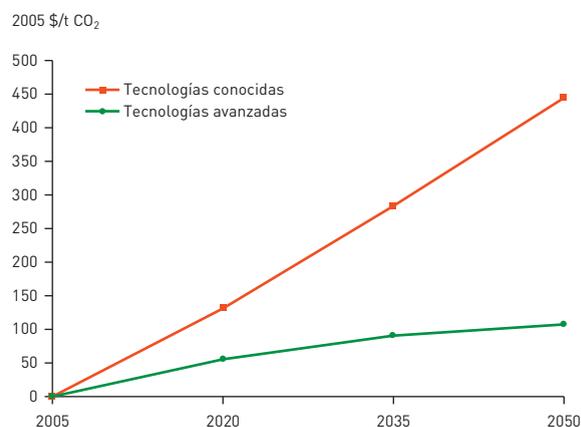
Cualquier estrategia que pretenda lograr una reducción sustancial de las emisiones de GEI exigirá medidas no solo para implantar las tecnologías de baja emisión que están disponibles hoy en día, sino también para promover la innovación en las nuevas tecnologías que se necesitan. En sintonía con esto, se ha registrado en los últimos años un creciente interés por las formas de impulsar esa innovación, en especial en lo referente al papel que los gobiernos pueden y deben desempeñar en ese proceso.

Aunque la investigación y el desarrollo son dos elementos importantes del proceso de innovación, va ganando terreno la noción de que la innovación tecnológica es un proceso complejo que normalmente conlleva interacciones con las otras fases del cambio tecnológico representadas en el cuadro 3. Así, los beneficios derivados de las nuevas tecnologías solo se materializan en muchos casos cuando se produce una adopción generalizada, un proceso que suele llevar un tiempo considerable (en muchos casos, décadas) y que incluye normalmente una secuencia de mejoras incrementales que impulsan el rendimiento y reducen los costes (Alic *et al.*, 2003).

En el contexto de este artículo, surge una pregunta esencial: ¿qué estrategias y políticas pueden impulsar de una forma más eficaz las innovaciones tecnológicas que contribuyen a reducir las emisiones de GEI? Como ya se ha señalado, las emisiones de GEI dependen fundamentalmente de los tipos de fuentes de energía y de las tecnologías que se emplean para suministrar los artículos y los servicios que la sociedad necesita. Así, las innovaciones tecnológicas pueden ayudar a reducir las emisiones de GEI de diversas formas (NRC, 2010). Por ejemplo:

- Las tecnologías nuevas o mejoradas pueden hacer que bienes como los vehículos, la maquinaria y los electrodomésticos usen la energía de un modo más eficiente, lo que reduce su consumo energético y las emisiones de GEI por unidad de producto o servicio útil (como un vehículo-milla de viaje o un lumen de luz en el caso de la iluminación).
- Las nuevas tecnologías pueden crear o utilizar vectores de energía y agentes químicos alternativos que emitan menos GEI por unidad de producto o servicio útil (como las fuentes de energía renovables o los nuevos fertilizantes con bajo contenido de nitrógeno).
- Las nuevas tecnologías pueden crear formas alternativas de suministrar bienes y servicios caracterizadas por una menor generación de GEI (ya sea mediante el uso de productos o materiales sustitutivos que emitan menos GEI

**Gráfico 5.** Precios globales del carbono (equivalente de CO<sub>2</sub>) necesarios para reducir las emisiones procedentes del uso de combustibles fósiles y de las fuentes industriales con tecnologías avanzadas y sin ellas



Fuente: Kyle *et al.*, 2009.

o a través de cambios de mayor alcance que afecten a todo el sistema, como el reemplazo de los desplazamientos en coche o en avión por las teleconferencias y el teletrabajo).

Las innovaciones tecnológicas pueden favorecer todo este espectro de posibilidades. Un conjunto aun más amplio de innovaciones incluiría, además, sistemas y diseños sociales e institucionales. Por ejemplo, las innovaciones en el planeamiento y el desarrollo urbanístico podrían ayudar a reducir la demanda energética futura (y las emisiones de GEI asociadas a ella) en el transporte y en los edificios residenciales y comerciales. Las innovaciones institucionales podrían proporcionar incentivos para que las compañías de suministro eléctrico y otras empresas inviertan en medidas que reduzcan la demanda energética, en lugar de guiarse por políticas dirigidas a aumentar la venta de energía.

El gráfico 5 muestra una estimación del modo en que las innovaciones tecnológicas pueden reducir el coste futuro del recorte de las emisiones de GEI. En este modelo, se compara un caso de evolución empresarial tradicional, caracterizado por las tasas históricas de mejoras tecnológicas, con un caso en el que el cambio tecnológico se

da con mayor rapidez. El coste de adaptarse a un escenario restrictivo de reducción de emisiones disminuye drásticamente cuando se dispone de *tecnologías avanzadas*. Este recorte en el coste unitario de la reducción se traduce en un gran ahorro en los costes a escala nacional y global, sobre todo a medida que los requisitos de reducción se van volviendo más estrictos con el tiempo.

### EL IMPORTANTE PAPEL DE LAS POLÍTICAS GUBERNAMENTALES

Uno de los desafíos más importantes de la reducción de las emisiones de GEI es que existen pocos mercados (si hay alguno) para muchas de las tecnologías de baja emisión más eficientes que se necesitan. ¿Qué compañía de suministro eléctrico, por ejemplo, querría invertir una gran cantidad de dinero en una tecnología de captura y almacenamiento de carbono si no hubiera un incentivo o una obligación que moviera a recortar sustancialmente las emisiones de CO<sub>2</sub>? ¿Cuántas personas estarían dispuestas a comprar un vehículo eléctrico avanzado que cuesta mucho más que un automóvil convencional solo para

reducir su huella de carbono? Algunas medidas costosas que las empresas y los individuos tendrían que adoptar para recortar sus emisiones de GEI proporcionan un valor tangible escaso o nulo a esa empresa o esa persona. Solo mediante acciones gubernamentales que exijan o hagan viable desde el punto de vista financiero reducir las emisiones de GEI se pueden crear mercados de cierta entidad para los productos y los servicios que posibilitan tales reducciones. Por tanto, las acciones gubernamentales dirigidas a crear o ampliar los mercados de las tecnologías de reducción de las emisiones de GEI son esenciales en el proceso de innovación tecnológica.

Las diferentes medidas políticas pueden influir de distintas formas en la innovación tecnológica. En general, las opciones políticas se pueden agrupar en dos categorías: medidas voluntarias y acciones obligatorias (*zanahorias y palos*). El primer grupo —denominado con frecuencia opciones de *políticas tecnológicas*— proporciona incentivos de varios tipos para fomentar ciertas acciones o ciertos avances tecnológicos. El segundo grupo está integrado por las acciones

**Cuadro 4.** Opciones políticas que pueden impulsar las innovaciones tecnológicas para reducir las emisiones de GEI

Opciones de políticas tecnológicas			Opciones de políticas de regulación
Fondos gubernamentales directos para la generación de conocimiento	Apoyo directo o indirecto a la comercialización y la producción	Difusión del conocimiento y aprendizaje	Medidas económicas generales y regulaciones y estándares específicos de distintos sectores o tecnologías
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contratos de I+D con empresas privadas (totalmente financiados o con costes compartidos)</li> <li>• Contratos y becas de I+D con universidades y entidades sin ánimo de lucro</li> <li>• I+D interno en laboratorios del gobierno</li> <li>• Contratos de I+D con consorcios o colaboraciones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Créditos fiscales de I+D</li> <li>• Patentes</li> <li>• Créditos fiscales o subsidios de producción para las empresas que introducen nuevas tecnologías en el mercado</li> <li>• Créditos fiscales, rebajas o pagos para los compradores y los usuarios de las nuevas tecnologías</li> <li>• Suministro por parte del gobierno de tecnologías nuevas o avanzadas</li> <li>• Proyectos piloto</li> <li>• Garantías de préstamo</li> <li>• Incentivos monetarios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación y capacitación</li> <li>• Codificación y difusión del conocimiento técnico (por ejemplo, a través de la interpretación y la validación de los resultados de I+D, la selección, el apoyo a bases de datos)</li> <li>• Estándares técnicos</li> <li>• Programas de ampliación tecnológicos e industriales</li> <li>• Publicidad, persuasión e información para el consumidor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impuesto sobre las emisiones</li> <li>• Programa de comercio de derechos de emisión</li> <li>• Estándares de rendimiento (para las tasas de emisión, la eficiencia u otras medidas del rendimiento)</li> <li>• Impuesto sobre los combustibles</li> <li>• Estándares de la cartera de políticas</li> </ul>

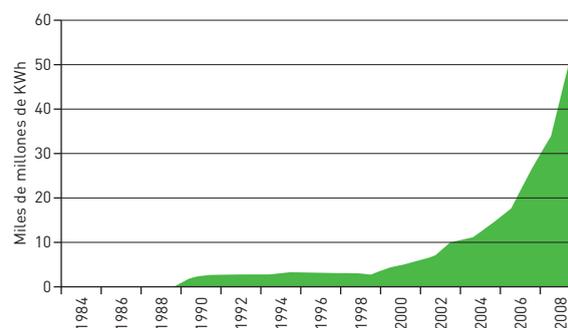
gubernamentales que imponen obligaciones o limitaciones en las actividades, instalaciones o tecnologías especificadas, normalmente por medio de normativas y estándares. El cuadro 2 ofrece ejemplos de opciones políticas correspondientes a cada una de estas dos categorías generales. Los análisis que siguen desarrollan brevemente las políticas de cada categoría para ilustrar su función en el fomento de las innovaciones que reducen las emisiones de GEI.

### OPCIONES DE POLÍTICAS TECNOLÓGICAS

Las medidas políticas tecnológicas pueden estimular la innovación y ayudar a crear mercados para las tecnologías con baja emisión de GEI proporcionando incentivos y apoyo para el desarrollo y la implantación de la nueva tecnología. El cuadro 2 muestra diversas medidas disponibles agrupadas en tres categorías. La primera es el respaldo gubernamental directo a las iniciativas de I+D para generar nuevos conocimientos (lo que incluye nuevos conceptos y nuevas tecnologías). Esta es la forma de apoyo gubernamental más común para la innovación y suele conllevar la participación de diversas organizaciones públicas y privadas (Alic *et al.*, 2003; CATF, 2009).

La segunda columna muestra otras opciones políticas que respaldan directa o indirectamente el desarrollo, la implantación y la comercialización de las nuevas tecnologías. Estas medidas ya han demostrado en el pasado un gran impacto en el desarrollo tecnológico. Por ejemplo, el suministro por parte del gobierno norteamericano de reactores y ordenadores durante las primeras fases de su comercialización tras la Segunda Guerra Mundial fue fundamental para el posterior desarrollo y la implantación generalizada de estas tecnologías en el mercado (Alic *et al.*, 2003). Más recientemente, el respaldo gubernamental en la forma de créditos fiscales de inversión y producción (o tarifas de régimen especial) ha impulsado el rápido crecimiento de los sistemas de energía eólica, como se muestra en el gráfico 6. Otras medidas, como las garantías de préstamo y el apoyo a los proyectos piloto, se

Gráfico 6. Crecimiento de la generación de electricidad procedente del viento en Estados Unidos



Fuente: EIA 2010.

están empleando en la actualidad para estimular las inversiones en tecnologías de *carbón limpio* como la gasificación del carbón y los sistemas de captura y almacenamiento de carbono.

El tercer grupo de opciones de políticas tecnológicas del cuadro 4 refleja las medidas ideadas para estimular el aprendizaje y la difusión del conocimiento. Entre ellas se incluye el apoyo a los programas de formación y capacitación, y medidas como el desarrollo de códigos y estándares que facilitan la difusión de las nuevas tecnologías.

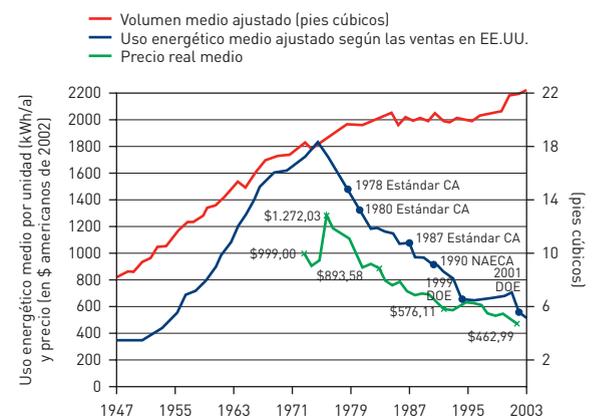
### OPCIONES DE POLÍTICAS DE REGULACIÓN

Las políticas de regulación en materia de energía y medio ambiente responden a *fallos del mercado* por los que los individuos y las organizaciones tienen pocos incentivos —o ninguno— para restringir las actividades que afectan negativamente a la sociedad en su conjunto (como la emisión de contaminantes a la atmósfera) si no se produce una intervención gubernamental. Diversos estudios han documentado la capacidad de las políticas de regulación sobre energía y medio ambiente para influir en el desarrollo y la implantación de tecnologías importantes relacionadas con la energía y para estimular las innovaciones que reducen las emisiones de GEI y otros contaminantes atmosféricos. Entre los ejemplos

más citados se hallan los estándares de ahorro de combustible y emisión de contaminantes para los automóviles (Lee *et al.*, 2010), los estándares de eficiencia energética para los principales electrodomésticos, como los frigoríficos (Rosenfeld, 2008), los estándares de rendimiento de las nuevas fuentes para los contaminantes atmosféricos de las centrales eléctricas (Rubin *et al.*, 2004) y los incentivos de mercado, como las reglas de comercio de derechos de emisión para las emisiones de SO<sub>2</sub> de las centrales eléctricas (Popp, 2003).

En 1975, por ejemplo, el gobierno norteamericano impuso los estándares Corporate Average Fuel Economy (CAFE) en todos los vehículos nuevos vendidos en Estados Unidos con el fin de reducir el consumo de combustible del país tras el embargo de petróleo árabe que se produjo en 1973. Los estándares exigían que el ahorro de combustible medio de 1973 de aproximadamente 13 millas por galón (mpg) se duplicara para llegar a los 27,5 mpg que el estándar CAFE establecía para los turismos nuevos. Esto provocó una serie de innovaciones tecnológicas que afectaron a casi todos los aspectos del diseño de automóviles. En poco más de una década, la flota automovilística de Estados Unidos duplicó prácticamente su eficiencia (EIA, 2010). En 2007, en respuesta a la renovada preocupación por las importaciones de petróleo, Estados Unidos adoptó unos estándares CAFE aun más estrictos. Las nuevas regulaciones exigen un ahorro de combustible medio en toda la flota (incluidos los turismos y los camiones) de 34,1 mpg en 2016 (NHTSA, 2010). Estos estándares también reducirán las emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) procedentes de la combustión. Aunque Estados Unidos lleva largo tiempo evitando las políticas de precios de la energía y los impuestos sobre el combustible y dando prioridad a la eficiencia energética, las evidencias acumuladas en otros países, incluidas muchas naciones de Europa occidental, indican que un aumento sustancial de los impuestos sobre la gasolina constituiría también un importante estímulo para la innovación en las tecnologías relacionadas con la automoción.

**Gráfico 7.** Tendencias del uso energético medio, el precio y el tamaño de los nuevos frigoríficos de Estados Unidos

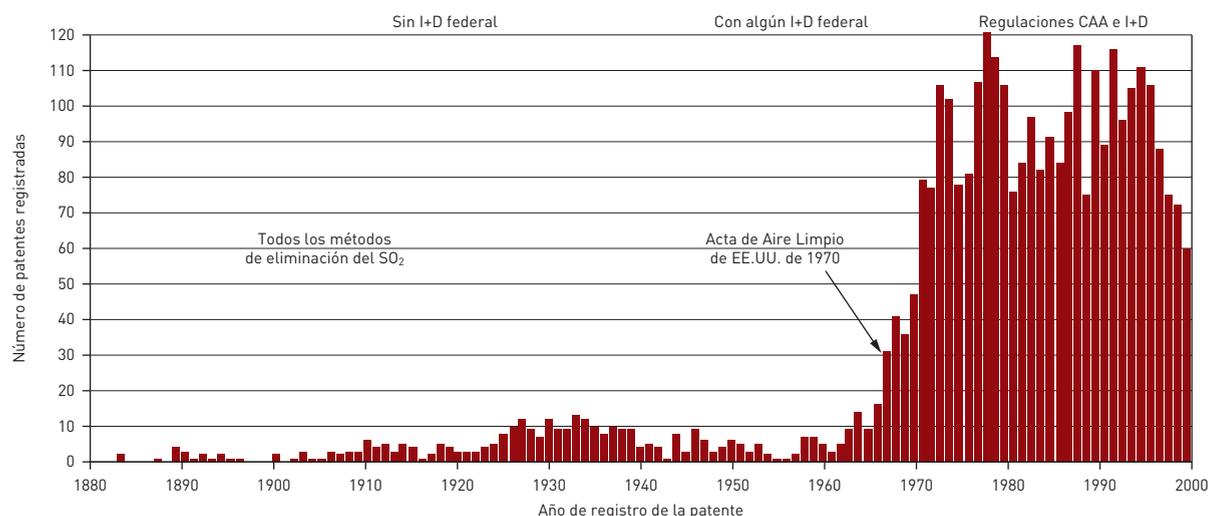


Fuente: Rosenfeld, 2008.

Los estándares de eficiencia energética también han reducido el uso medio de energía de los principales electrodomésticos, como los frigoríficos, los lavaplatos y los equipos de aire acondicionado. El gráfico 7, por ejemplo, muestra la brusca disminución del consumo energético medio de los nuevos frigoríficos —en aquel momento el electrodoméstico con mayor consumo energético de Estados Unidos— tras la adopción de los estándares del Estado de California definidos en la década de 1970 y de los estándares nacionales posteriores que se aprobaron en 1990. Como resultado de las innovaciones tecnológicas, el uso medio anual de energía de los frigoríficos se redujo a un tercio del valor de 1975. A la vez, el precio medio de venta al público de un frigorífico nuevo cayó a la mitad, a pesar de que el tamaño promedio de las nuevas unidades había aumentado. El ahorro general en la demanda de electricidad eliminó la necesidad de construir muchas nuevas centrales eléctricas, lo que evitó también las emisiones de GEI y de contaminantes atmosféricos asociadas a ellas.

El caso de las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) generadas por las centrales eléctricas ilustra también la influencia potencial de los estándares de rendimiento en la innovación para las tecnologías de control medioambiental. En 1970 se adoptaron en Estados Unidos unos

**Gráfico 8.** Actividad de registro de patentes en el ámbito de las tecnologías de eliminación de dióxido de azufre en Estados Unidos, 1880-2000



Fuente: Taylor et al., 2005.

estrictos límites nacionales para las emisiones de  $\text{SO}_2$  generadas por las nuevas centrales cuyo funcionamiento dependía de la combustión de carbón. Como resultado, se produjo un importante aumento de la *actividad inventora*, medida por el número de patentes norteamericanas registradas (en todo el mundo) en el ámbito del control del  $\text{SO}_2$ , como se puede ver en el gráfico 8. Cuando la tecnología de captura posterior a la combustión pasó a ser obligatoria y se empezó a implantar de una forma más general, los costes de capital de estos sistemas se redujeron a menos de la mitad a lo largo de dos décadas y los costes operativos también experimentaron un brusco recorte (Taylor et al., 2005; Rubin et al., 2007). Durante este periodo, el rendimiento de estos sistemas también mejoró considerablemente: en la década de 1970, los *lavadores* de  $\text{SO}_2$  solían capturar un 80% de las emisiones potenciales. En 1990 se había llegado a un 90% de eliminación de  $\text{SO}_2$  como norma, cantidad que cinco años más tarde había subido al 95% o más (Rubin, 2001). Hoy en día, los mejores sistemas tienen una eficacia de hasta el 99% en la captura de  $\text{SO}_2$ . Para que las tecnologías de captura y almacenamiento de  $\text{CO}_2$  se conviertan en una opción con una buena relación entre coste y eficacia para las reducciones de GEI, serán

necesarias mejoras continuas similares del coste y el rendimiento (Rubin, 2009). La historia de la captura del  $\text{SO}_2$  generado por la combustión sugiere que unas políticas de regulación bien diseñadas pueden ayudar a alcanzar ese objetivo.

Las políticas de regulación descritas son ejemplos de lo que a menudo se denomina regulaciones de *comando y control*, que obligan a los contaminadores o los fabricantes a alcanzar unos niveles especificados de rendimiento tecnológico en sus instalaciones. La adopción más reciente de regulaciones basadas en el mercado, como los sistemas de comercio de derechos de emisión establecidos para el cumplimiento con la legislación sobre lluvia ácida y el control del ozono en verano (Yeh et al., 2005), ofrece a los contaminadores una mayor flexibilidad en el cumplimiento de las exigencias nacionales o regionales para alcanzar un nivel conjunto de reducción de las emisiones. Esta flexibilidad puede recortar considerablemente el coste del cumplimiento de las normativas.

Un programa de comercio de derechos de emisión extensivo a toda la economía es una estrategia de regulación que cuenta con un amplio respaldo y se considera el medio de mitigación de las emisiones de gas de efecto invernadero con mejor relación entre coste y eficacia (Jaffe

“Las medidas políticas tecnológicas voluntarias no bastarán para estabilizar los niveles de GEI (gases de efecto invernadero). Se necesitan además unas políticas de regulación suficientemente restrictivas para limitar las emisiones de GEI y fomentar la innovación tecnológica”

*et al.*, 2003). Esta estrategia es además el eje del sistema de comercio de emisiones (ETS, Emissions Trading System) para las emisiones de dióxido de carbono en la Unión Europea. Como alternativa, muchos economistas defienden un impuesto sobre las emisiones de GEI como método de mercado preferible para reducir las emisiones de GEI (NRC, 2010a). Las dos estrategias pueden estimular la innovación mediante el establecimiento de incentivos económicos y mercados para las medidas dirigidas a reducir las emisiones. En el caso del comercio de derechos de emisión, se necesita un límite suficientemente restrictivo, mientras que en el de las tarifas de las emisiones, se debe establecer un impuesto suficientemente alto. Dado que contamos con menos experiencia histórica en estas regulaciones basadas en el mercado, la evidencia empírica de su eficacia para estimular las innovaciones tecnológicas que reducen las emisiones medioambientales es limitada. Sin embargo, en el caso del control del SO<sub>2</sub>, un estudio de los datos

de las patentes mostró que el programa de comercio de derechos de emisión aprobado en 1990 en Estados Unidos impulsó innovaciones que redujeron el coste operativo de las unidades de captura de SO<sub>2</sub> y mejoraron su eficiencia en la eliminación de SO<sub>2</sub> (Popp, 2003). Algunos estudios pusieron además de manifiesto que el programa de comercio de derechos de emisión de SO<sub>2</sub> fomentó cambios en los procedimientos internos de las empresas reguladas, además de innovaciones e inversiones por parte de los proveedores de estas firmas (Burtraw *et al.*, 2005). Existe una sólida base teórica que respalda el importante papel que las políticas basadas en el mercado desempeñan en una estrategia integral para abordar el cambio climático.

#### ELECCIÓN DE OPCIONES POLÍTICAS

Los méritos y las limitaciones de las distintas políticas posibles para la mitigación del cambio climático centran un amplio debate en la literatura y los foros políticos. La elección de las políticas adoptadas por cualquier nación, de manera unilateral o en el marco de un acuerdo internacional, dependerá, forzosamente, de un gran número de factores y circunstancias cuyo análisis queda fuera del alcance de este texto. El análisis anterior pretendía, más bien, ilustrar algunas de las formas en las que las opciones políticas pueden afectar a la innovación tecnológica para la atenuación de los GEI. Asimismo, es obligado señalar que otros tipos de políticas, como las de registro de patentes y las regulaciones antimonopolio, también pueden tener una influencia indirecta en la innovación, según se concluye en el trabajo de Alic *et al.* (2003).

En la mayoría de los casos, la ruta preferida para la mitigación del cambio climático y la innovación tecnológica será una combinación de políticas que ofrezcan tanto «zanahorias» como «palos». El sencillo pero importante mensaje de esta sección es que las medidas políticas tecnológicas voluntarias no bastarán para estabilizar los niveles de GEI. Se necesitan además unas políticas de regulación suficientemente restrictivas

para limitar las emisiones de GEI y fomentar la innovación tecnológica.

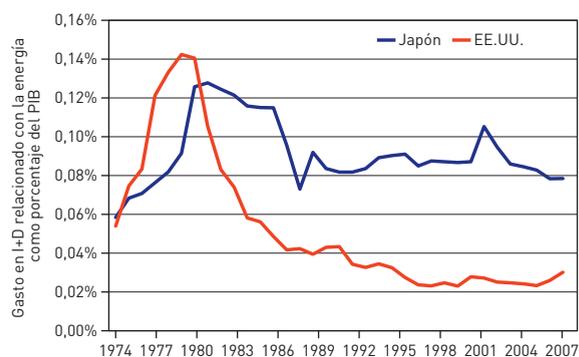
### RECURSOS NECESARIOS PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

Alcanzar los objetivos del cambio climático requerirá, además de un conjunto de estímulos políticos, una inyección de recursos financieros y humanos para apoyar cada fase del proceso de cambio tecnológico representado en el cuadro 3. Esos recursos son especialmente importantes en la fase de innovación tecnológica. En concreto, hay una necesidad clara de aumentar el respaldo financiero a las iniciativas de I+D y de encontrar personas que cuenten con la formación, los conocimientos y la creatividad que se requieren para innovar, no solo con respecto a las tecnologías para el suministro y la demanda de energía, sino también en otros sectores que emiten GEI, como la agricultura, la ingeniería forestal y la manufactura.

Sin duda, una mayor inyección de recursos exige hoy en día un planteamiento mixto. En los últimos años, por ejemplo, China —que es actualmente el mayor emisor de GEI del mundo— ha puesto en marcha un importante aumento de las inversiones en tecnologías energéticas *verdes* que la ha convertido en el primer fabricante mundial de células solares fotovoltaicas, así como en una potencia dominante en los sistemas de energía eólica. Además, China está realizando inversiones cuantiosas en la generación de potencia nuclear y está desarrollando diversas tecnologías de carbón limpio, incluidos algunos sistemas de captura y almacenamiento de carbono.

En Estados Unidos, por el contrario, los fondos gubernamentales nacionales dedicados a los esfuerzos de I+D en el campo de la energía se han reducido bruscamente en las tres últimas décadas. En términos reales, en 2008 estos fondos representaban menos de un quinto de su cuantía en 1980. Aunque los fondos federales de I+D para la energía han aumentado en Estados Unidos en los últimos años —lo que incluye un importante incremento en 2009 como parte de

Gráfico 9. Gasto gubernamental en I+D en el ámbito de la energía en Japón y Estados Unidos, 1974-2008



Fuente: NRC, 2010a.

un programa de estímulo económico—, la inversión de Estados Unidos en I+D en el ámbito de la energía sigue siendo muy inferior a la de otras áreas clave de la ciencia y la tecnología como el espacio y la sanidad (NRC, 2010a). Si se compara con otros muchos países industrializados (como Canadá, Dinamarca, Finlandia, Francia, Japón, Corea, Noruega y Suecia), la inversión de Estados Unidos en I+D para la energía también es sustancialmente más baja si se expresa como fracción del producto interior bruto (PIB) (IEA, 2009). Esta situación se ilustra en el gráfico 9, que compara el gasto gubernamental en I+D energético en Estados Unidos y Japón como porcentaje del PIB. En las últimas tres décadas, el porcentaje norteamericano ha sido muy inferior al de Japón. Aunque en términos absolutos el gasto de Estados Unidos es superior al de otras naciones más pequeñas, los datos normalizados sugieren que en Estados Unidos las iniciativas de I+D relacionadas con la energía se consideran menos prioritarias que en otros países.

Por último, si se desea encontrar una solución al problema del cambio climático, el papel más destacado en materia de innovación tecnológica corresponde al sector privado. Sobre los fondos dedicados en el sector privado a las iniciativas de I+D relacionadas con la energía no hay demasiados datos fiables. La Agencia Internacional de

la Energía (IEA, International Energy Agency) y otras fuentes sugieren que la tasa actual de inversión en I+D por parte del sector energético es muy inferior a la de ámbitos como el farmacéutico, la biotecnología y los servicios de *software* e informática, sectores cuya rentabilidad depende en mayor medida de la capacidad para crear productos nuevos o superiores. Dentro del sector energético, las centrales eléctricas registran por lo general la menor tasa de gasto en I+D expresado como porcentaje de las ventas (uno de los indicadores más comunes) (NRC, 2010a). Esto apunta a que se necesitará un importante aumento en las inversiones en I+D del sector privado para desarrollar y comercializar nuevas tecnologías de baja emisión que contribuyan a resolver el problema del cambio climático. Las políticas gubernamentales, a su vez, deben proporcionar las señales y los mercados potenciales necesarios para estimular las inversiones en I+D del sector privado y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las innovaciones tecnológicas concebidas para reducir las emisiones de GEI requerirán también más trabajadores cualificados, en especial ingenieros y científicos de una amplia gama de disciplinas entre las que se incluyen las ciencias sociales. Los datos limitados existentes para Estados Unidos sugieren que actualmente en el sector energético la media de trabajadores en I+D como porcentaje de la población activa total es muy inferior a la de todos los sectores. A lo largo de las últimas dos décadas, el porcentaje de licenciados universitarios en distintos campos de la ingeniería también se ha reducido sustancialmente en Estados Unidos (NRC 2010a). Aunque otros países presentan tendencias más favorables, deben aumentar los esfuerzos encaminados a inyectar en el ámbito de las innovaciones talento y recursos humanos que pueden contribuir a atenuar el cambio climático.

## CONCLUSIÓN

Aunque tradicionalmente el estudio de la innovación tecnológica ha estado motivado por el

“Será necesario un cambio tecnológico a gran escala en las próximas décadas para alcanzar el objetivo internacional de estabilizar los niveles atmosféricos de gases de efecto invernadero (GEI) en valores que eviten los efectos peligrosos”

interés en el desarrollo económico y la competitividad en una economía de mercado, los lazos existentes entre la innovación y la consecución de los objetivos de calidad medioambiental han ido ganando un protagonismo cada vez mayor. Este artículo ha analizado el importante papel que la innovación tecnológica desempeña en la solución del problema del cambio climático global, probablemente el desafío medioambiental más apremiante al que nos enfrentamos en la actualidad.

Como se ha señalado, será necesario un cambio tecnológico a gran escala en las próximas décadas para alcanzar el objetivo internacional de estabilizar los niveles atmosféricos de gases de efecto invernadero (GEI) en valores que eviten los efectos peligrosos. Para lograrlo, las tecnologías actuales con elevadas emisiones de GEI —especialmente las tecnologías energéticas basadas en los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón)— habrán de reemplazarse con nuevas tecnologías que emitan una cantidad menor o nula de gases de efecto invernadero. En muchos casos, este proceso requerirá tecnologías avanzadas que aún no se han desarrollado, no se han adoptado a una

escala comercial apreciable o que ni siquiera se han inventado.

Los estudios sobre el cambio tecnológico señalan que se trata de un proceso complejo que conlleva interacciones entre las distintas fases que lo integran (invención, innovación, adopción y difusión de la nueva tecnología en el mercado). En general, los beneficios proporcionados por las nuevas tecnologías solo se materializan con su adopción generalizada, un proceso que suele llevar un tiempo considerable.

Las políticas gubernamentales influyen en los resultados de cada fase de este proceso. La fase de innovación tecnológica —que lleva al desarrollo de nuevos procesos y tecnologías— es especialmente incierta, porque las rutas de desarrollo y la probabilidad de éxito no se pueden predecir con seguridad. Hay que tener en cuenta, además, que el desarrollo de una nueva tecnología no garantiza su viabilidad comercial.

Las políticas gubernamentales desempeñan un papel especialmente importante en el fomento de las innovaciones con las que se intenta responder al problema del cambio climático. En ausencia de imposiciones o incentivos gubernamentales para mitigar el problema, existen pocos mercados —si es que hay alguno— para las nuevas tecnologías que tienen como finalidad única reducir las emisiones al medio ambiente (aire, agua o tierra). Así, para alcanzar las grandes reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero que se necesitan para aminorar los riesgos asociados al cambio climático, debe entrar en juego una amplia cartera de políticas que no solo fomenten la innovación tecnológica, sino también la subsiguiente adopción de las nuevas tecnologías por parte de un gran número de agentes entre los que se incluyen individuos, gobiernos y empresas de todos los tamaños.

La cartera de políticas para impulsar la innovación debe incluir una combinación de «palos» —en la forma de políticas de regulación que definan directa o indirectamente los límites de las emisiones de GEI (por medio de mecanismos

basados en el mercado, estándares de rendimiento tecnológico o una combinación de medidas)— y «zanahorias» o políticas tecnológicas que proporcionen incentivos voluntarios para fomentar la innovación y la implantación de la tecnología (apoyo para I+D, créditos fiscales, garantías de préstamo, programas de suministro gubernamentales y otras medidas). Para que se materialicen todos los beneficios de la innovación tecnológica, la cartera de políticas debe respaldar también la difusión del conocimiento, ya sea a través del apoyo financiero a la formación y la capacitación o con la ayuda de otras medidas.

Aunque las iniciativas de I+D no bastan para garantizar un cambio tecnológico generalizado, son un elemento clave de la cartera de políticas requeridas para impulsar las innovaciones que reducen las emisiones de GEI. Como se ha señalado en este artículo, será necesario un aumento sustancial del respaldo gubernamental a los esfuerzos de I+D realizados en el ámbito de la energía para responder a los retos del cambio climático. También en el sector privado deberán producirse grandes incrementos en el apoyo a las iniciativas de I+D, especialmente en las industrias relacionadas con la energía. De nuevo, las políticas gubernamentales desempeñarán un papel fundamental al establecer los requisitos y los indicios de mercado que el sector privado necesita para justificar las inversiones en I+D.

Por último, la reducción de las emisiones de GEI a través de las innovaciones en tecnología y las instituciones exigirá un mayor número de trabajadores cualificados, en especial ingenieros y científicos de disciplinas muy diversas, como, entre otras, las ciencias sociales. A la postre, son las personas las que innovan. Tanto el gobierno como el sector privado deben hacer grandes esfuerzos por atraer y retener a las personas más brillantes y capacitadas del planeta para dar respuesta a los desafíos e idear oportunidades que contribuyan a mitigar el cambio climático global.

## BIBLIOGRAFÍA

- BURTRAW *et al.* (2005), «Economics of Pollution Trading for SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>», *Annual Review of Environment and Resources* 30, pp. 253-289, Palo Alto, CA: Annual Reviews.
- CATF (2009), Consortium for Science, Policy & Outcomes and Clean Air Task Force. *Innovation Policy for Climate Change: A Report to the Nation, A joint project of the Consortium for Science, Policy & Outcomes and Clean Air Task Force*, Boston, MA: Clean Air Task Force. Septiembre.
- CLARKE *et al.* (2009), «International Climate Policy Architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios», *Energy Economics* 31 (Suplemento 2), pp. 64-81.
- EIA 2010. *Annual Energy Review 2009*. Energy Information Administration, Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- FAWCETT *et al.* (2009), «Overview of EMF 22 U.S. Transition Scenarios», *Energy Economics* 31 (Suplemento 2), pp. 198-211.
- IEA (2000), International Energy Agency. *Experience Curves for Energy Technology Policy*. Paris.
- IEA (2009), International Energy Agency. *Ensuring Green Growth in a Time of Economic Crisis: The Role of Energy Technology*. Paris. p. 7.
- IPCC (2007a), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. S. Solomon *et al.* (eds.), Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2007b), *Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz *et al.* (eds.), Cambridge: Cambridge University Press.
- JAFFE, A. B., R. G. NEWELL y R. N. STAVINS (2003), «Technology Policy for Energy and the Environment» en A. Jaffe, J. Lerner y S. Stern, (eds.), *Innovation Policy and the Economy*, Conference Report, National Bureau of Economic Research.
- KYLE *et al.* (2009), «The Value of Advanced Technology in Meeting 2050 Greenhouse Gas Emissions Targets in the United States». *Energy Economics* 31(2), pp. 254-267.
- LEE J., *et al.* (2010), «Forcing technological change: A case of automobile emissions control technology development in the US». *Technovation* 30, pp. 249-264.
- MCDONALD, A., y L. SCHRATTENHOLZER (2002), «Learning Curves and Technology Assessment», *International Journal of Technology Management* 23, pp. 718-745.
- NHTSA (2010), National Highway and Traffic Safety Administration. «NHTSA and EPA establish new national program to improve fuel economy and reduce greenhouse gas emissions for passenger cars and light trucks». Consultado el 15 de agosto de 2010 en: <http://www.nhtsa.gov/fuel-economy>.
- NRC (2010a), National Research Council, *Limiting the Magnitude of Climate Change*, Washington, DC: The National Academies Press, p. 202.
- NRC (2010b), National Research Council, *Advancing the Science of Climate Change*, Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC (2010c), National Research Council. *Adapting to the Impacts of Climate Change*, Washington, DC: The National Academies Press.
- POPP, D. (2003), «Pollution Control Innovations and the Clean Air Act of 1990», *Journal of Policy Analysis and Management* 22(4), pp. 641-660.
- ROSENFELD, A. H. (2008), «Energy Efficiency: The first and most profitable way to delay Climate Change». Ponencia Oppenheim, UCLA Institute of the Environment, University of California, Los Angeles, 25 de febrero. Consultado el 15 de marzo de 2008 en: <http://www.energy.ca.gov/commission/commissioners/rosenfeld.html>.
- RUBIN, E. S. (2001), *Introduction to Engineering and the Environment*, Boston, MA: McGraw-Hill.
- RUBIN, E. S., *et al.* (2004), «Learning Curves for Environmental Technology and Their Importance for Climate Policy Analysis», *Energy* 29, pp. 1551-1559.
- RUBIN, E. S., *et al.* (2007), «Use of Experience Curves to Estimate the Future Cost of Power Plants with CO<sub>2</sub> Capture», *International Journal of Greenhouse Gas Control* 1, pp. 188-197.
- RUBIN, E. S. (2009), *A Performance Standards Approach to Reducing CO<sub>2</sub> Emissions from Electric Power Plants*. Coal Initiative Reports, White Paper Series, Arlington, VA: Pew Center on Global Climate Change. Mayo.
- TAYLOR, M. R., E. S. RUBIN y D. A. HOUNSHELL (2005), «Control of SO<sub>2</sub> Emissions from Power Plants: A Case of Induced Technological Innovation in the US». *Technological Forecasting and Social Change* 72(6), julio, pp. 697-718.
- YEH *et al.* (2005), «Technology Innovations and Experience Curves for Nitrogen Oxides Control Technologies». *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55, diciembre, pp. 1827-1838.