

Energía

# El mundo en 2050

## Crecimiento global y políticas de cambio climático



\*connectedthinking

PRICEWATERHOUSECOOPERS 



# El mundo en el 2050

Implicaciones del crecimiento mundial en las emisiones de CO<sub>2</sub> y las políticas en materia de cambio climático

# Índice<sup>1</sup>

3 Resumen ejecutivo

11 Introducción

15 Metodología, supuestos de base y escenarios alternativos

31 Crecimiento económico y consumo energético: previsiones hasta el 2050 en los distintos escenarios

39 Implicaciones para las emisiones de CO<sub>2</sub> y el cambio climático en los distintos escenarios

42 Opciones políticas y tecnológicas para controlar las emisiones de CO<sub>2</sub>

53 Anexo: Descripción técnica del modelo de crecimiento económico a largo plazo

54 Bibliografía

<sup>1</sup>El presente informe se ha elaborado únicamente con fines orientativos; no se trata de asesoramiento profesional propiamente dicho y, en consecuencia, no deben tomarse decisiones a partir de la información contenida en este informe sin el debido asesoramiento profesional.

No se garantiza (ni de modo implícito ni explícito) que la información contenida en el presente informe sea completa ni precisa y, con arreglo a la legislación vigente, PricewaterhouseCoopers, sus miembros, sus empleados y sus agentes no se hacen responsables de las consecuencias derivadas de que el lector o una tercera persona actúe, o se abstenga de hacer algo, a consecuencia de la información contenida en el presente informe, y tampoco se aceptarán responsabilidades derivadas de decisiones tomadas en base al presente informe.

# Resumen Ejecutivo

En marzo de 2006, publicábamos un informe en el que destacaba el rápido crecimiento y la creciente importancia a nivel mundial de un grupo de economías emergentes: el E7, compuesto por China, la India, Brasil, Rusia, México, Indonesia y Turquía.

De cara a 2050, estimábamos que el E7 podría superar al actual G7, entre un 25 y un 75%, dependiendo de las medidas utilizadas. Y conforme vaya aumentando su tamaño relativo, estas economías emergentes serán cada vez más el motor del crecimiento global.

Ante esta posibilidad, cabe plantearse la pregunta siguiente: ¿puede el mundo sostener un crecimiento tan rápido sin experimentar serios efectos adversos en sus condiciones climáticas?

En el presente informe, nos planteamos esta cuestión ampliando nuestro modelo económico a largo plazo para incorporar los efectos del crecimiento del PIB mundial en el consumo de energía global y en las emisiones de CO<sub>2</sub>. También tratamos de poner sobre la mesa las estrategias políticas y tecnológicas para mitigar las emisiones de dióxido de carbono globales sin que sea necesario un gran sacrificio del crecimiento económico.

# Distintos Escenarios

A partir de nuestro modelo económico global, nos basamos en una serie de escenarios ilustrativos para prever la evolución futura del consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo:

- Un escenario base, en el que la eficiencia de la energía mejora según las tendencias de los últimos 25 años, sin cambios en el mix de combustibles por país. Cabe destacar que éste pretende ser un escenario “business as usual”, que nos sirva de punto de referencia para evaluar la necesidad de cambio, más que una previsión de la situación más probable de cara al futuro.
- Un escenario desfavorable, en el que las mejoras de eficiencia energética anuales están un 1% por debajo del escenario base, sin cambios en el mix de combustibles. Este escenario puede darse en caso de avances tecnológicos importantes que reduzcan los costes de extracción de combustible fósil y los precios energéticos asociados, de modo que desaparezcan los incentivos económicos para aportar mejoras de eficiencia energética y para recurrir a combustibles no fósiles.
- Un escenario de crecimiento limitado, en el que los supuestos energéticos son como en el escenario base, pero el incremento del PIB es inferior, sobre todo en las economías emergentes del E7.
- Un escenario con un mix de combustibles más ecológico, en el que se respetan los valores del escenario de base pero con una variación significativa: el paso de los carburantes fósiles a la energía renovable y nuclear de cara a 2050.
- Un escenario de crecimiento ecológico, en el que el mix de combustibles ecológico del escenario anterior se

combina con una mejora de eficiencia energética de un 1% anual con respecto al escenario de base.

- Un escenario más que vamos a llamar crecimiento ecológico + CCS, en el que también se incorpora una reducción de las emisiones posibles gracias al uso de tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, más conocidas por las siglas inglesas CCS (carbon capture and storage).

Los detalles de nuestro escenario base y de los demás escenarios se establecen en el capítulo 1 del presente informe. Los capítulos 2 y 3 presentan los resultados de nuestro modelo para

el PIB global, el consumo de energía primaria y las emisiones de CO<sub>2</sub>, según se resume a continuación.

Resultados básicos: Incremento del PIB, consumo de energía primaria y emisiones de CO<sub>2</sub>

En la tabla A que encontramos a continuación se resumen los resultados básicos de nuestro estudio en los seis escenarios elegidos. La última columna muestra el incremento acumulado de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre el año 2004 (el año base para el modelo) y el año 2050.

Tabla A: Previsión media anual del aumento del consumo de energía primaria y del crecimiento económico en los diferentes escenarios: 2004-2050 (% pa)

Crecimiento (% pa, excepto última columna)	PIB	Energía primaria	Combustibles no fósiles*	Emisiones de CO <sub>2</sub>	
				Crecimiento medio anual	Incremento acumulado hasta 2050 (% Diferencia)
Escenario desfavorable	3,2	2,6	2,6	2,6	233
Escenario base	3,2	1,6	1,6	1,6	112
Mix de combustible más ecológico	3,2	1,6	3,6	1,1	64
Crecimiento limitado	2,6	1,0	1,0	1,0	61
Crecimiento ecológico	3,2	0,6	2,5	0,1	4
Crecimiento ecológico + CCS	3,2	0,6	2,5	-0,4	-17

\*Nuclear y renovables.  
Fuente: Previsiones del modelo de PwC.



El escenario desfavorable, que incorpora un modesto grado de mejoras de eficiencia energética (0,6% pa comparado con la tendencia histórica del 1,6% pa), implica un incremento muy importante en emisiones de CO<sub>2</sub> anuales en el período hasta el 2050 (véase el gráfico A).

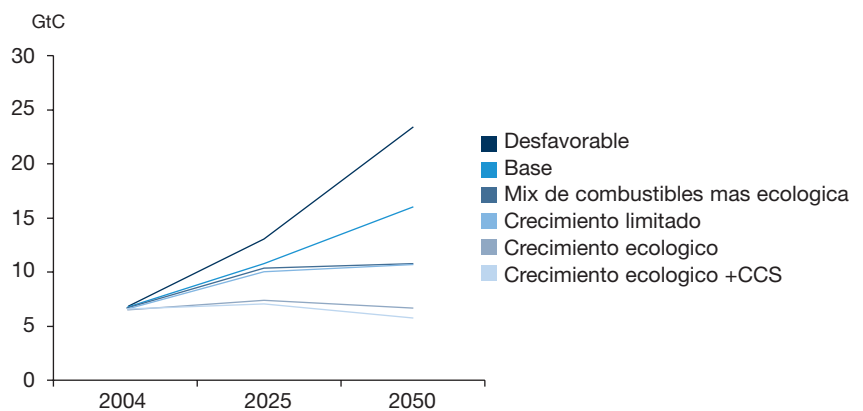
El impacto acumulado de esta situación, según se ilustra en el gráfico B, se traduciría en que los niveles atmosféricos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)<sup>2</sup> habrían aumentado en torno a las 625 ppm en 2050 (en comparación con las 380 ppm actuales), sin signos de estabilización. En este sentido, parece que la idea comúnmente aceptada en los círculos científicos es que es necesario que se establezca la cifra en un máximo de 500 ppm (preferiblemente, 450 ppm o menos) si se quiere reducir el riesgo de efectos adversos severos en el cambio climático global a unos niveles manejables.

Según la mayoría de científicos, el cambio climático va asociado a un incremento global de temperaturas de más de 2 °C, lo que podría provocar la subida del nivel del mar y la inundación de las áreas costeras; temporales extremos más frecuentes; posible impacto en la Corriente del Golfo; alteración de sectores agrícolas tradicionales, sobre todo en los países en vías de desarrollo; sequías en áreas con fuertes subidas de temperatura; amenazas a la biodiversidad; posibles efectos si las altas temperaturas reducen la capacidad de los océanos, del suelo y de las selvas de actuar como sumideros naturales de dióxido de carbono, de modo que se magnificaría todo efecto climático negativo inicial si aumentaran las emisiones de CO<sub>2</sub>, etc.

Teniendo en cuenta estos riesgos, el principio de precaución sugiere que, dado que los costes económicos no son demasiado elevados, valdría la pena pagar una modesta “prima de seguro” ahora para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de modo significativo, en lugar de exponernos a unos costes socioeconómicos futuros que serán mucho mayores, por muy difícil que sea cuantificarlos en estos momentos.

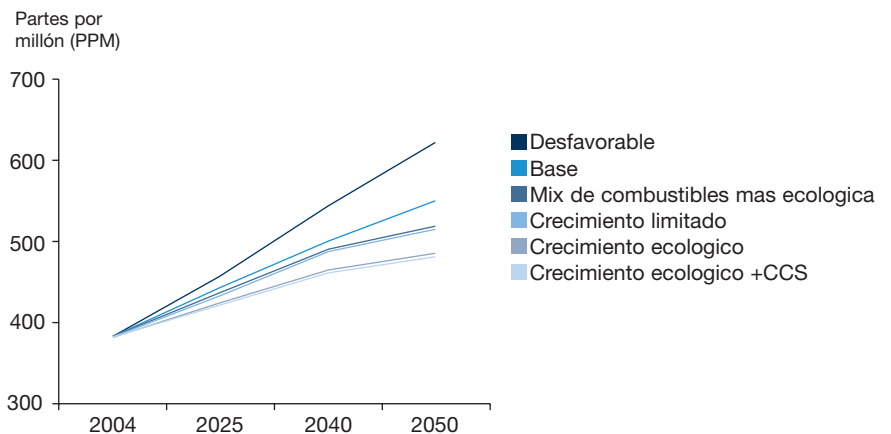
El escenario base, que prevé unas mejoras de eficiencia energética en la línea de las tendencias históricas, es menos severo que el escenario desfavorable, pero implica que las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial se habrán duplicado en 2050 y que los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub> girarán en torno a 550 ppm, con pocos signos de estabilización (véanse los gráficos A y B).

Gráfico A: Previsión de emisiones de CO<sub>2</sub> en los distintos escenarios



Fuente: Previsiones del modelo de PWC

Gráfico B: Previsión de los niveles de concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> en los distintos escenarios



Fuente: Previsiones del modelo de PWC

<sup>2</sup> Los niveles de concentración atmosférica de dióxido de carbono se miden en partes por millón (ppm) e incorporan el impacto acumulado de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los 200 años anteriores. Los niveles de CO<sub>2</sub> de la etapa preindustrial estaban en torno a las 280 ppm y ahora se han situado en unas 380 ppm. El CO<sub>2</sub> es el responsable en un 75% aproximadamente del efecto invernadero global según las estimaciones científicas, por lo que nuestro informe se centra en esas emisiones. Es importante no pasar por alto, en cambio, que las actuaciones para reducir las emisiones de otros gases de efecto invernadero (como el metano) también son importantes, sobre todo para el impacto climático global a corto plazo.

Según el consenso científico, esto puede implicar riesgos significativos de efectos adversos severos a raíz del cambio climático derivado de esos niveles de CO<sub>2</sub>.<sup>3</sup> En el total previsto a nivel mundial para este escenario, las emisiones de CO<sub>2</sub> del E7 en principio aumentarán en torno al 225% entre 2004 y 2050, lo que contrasta con el 30% de aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> del G7 para este mismo período. En este escenario base, China respondería de un 25% de las emisiones de CO<sub>2</sub> mundiales en 2050, seguida por los EE.UU. (15%), la India (11%) y la Unión Europea (9%).

Una de las razones para estos resultados en el escenario base es la elevada presencia del carbón (y el bajo uso de energías renovables y gas) en las economías india y china, que experimentan un crecimiento relativamente rápido e importante. En realidad, es probable que vayan dejando el carbón con el tiempo, lo que quizá nos acercará a un escenario con un mix de combustibles más ecológico, aunque la escala del incremento en energía nuclear<sup>4</sup> y energías renovables en este escenario (3,6% de incremento anual medio hasta 2050) se puede considerar relativamente ambiciosa, dados los obstáculos económicos y políticos que habrá que superar en estas zonas (una subida de precios del gas también puede impedir que se pase al gas a corto plazo, como se tratará más adelante en este informe). Además, como se puede ver en el gráfico B, el escenario con un mix de combustibles más ecológico sigue comportando unos niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub> que llegan a las 520 ppm en 2050, sin signos inmediatos de estabilización.

El escenario de crecimiento limitado

nos ofrece un perfil bastante similar al del escenario con un mix de combustibles más ecológico en cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub> y los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub>, pero su PIB global en el año 2050 es un 24% más bajo que en los otros escenarios. Teniendo en cuenta que el crecimiento limitado es más un objetivo político, como algunos expertos en medio ambiente han sugerido, puede parecer un precio muy alto a pagar desde el punto de vista económico, sobre todo teniendo en cuenta que la carga de ese ajuste puede recaer de un modo muy importante en las economías emergentes.

El análisis hecho en este informe y en otros informes similares sugiere que hay otras maneras, con costes mucho más bajos, de controlar las emisiones de CO<sub>2</sub> sin tener que restringir el crecimiento económico. Por otro lado, con respecto al escenario de base, este escenario puede que implique una menor necesidad de lograr mejoras de eficiencia energética y de adoptar una mix energética menos basada en el carbón. Pero en realidad, no podemos confiar en esa reducción del PIB, por lo que preferimos centrarnos en los escenarios según las previsiones del PIB del escenario base.

En otro orden de cosas, la disminución de las reservas de combustibles fósiles (lo cual puede imponer una presión al alza de los precios energéticos) y las preocupaciones medioambientales también pueden ser argumentos plausibles para dar un empuje a las mejoras de eficiencia energética, de modo que tendamos al escenario de crecimiento ecológico. Estas mejoras pueden ir desde la eficiencia de los carburantes para vehículos hasta el diseño de los

<sup>3</sup> En el Informe Stern (2006) se nos ofrece un buen resumen de los argumentos por los que el escenario actual sin variaciones parece inaceptable, por los riesgos que comporta.

<sup>4</sup> Algunas plantas nucleares llegarán al fin de sus días en los próximos 10-20 años, de modo que aunque se ponga en marcha un programa acelerado de construcción de nuevas plantas, lo único que se conseguirá será mantener las cifras actuales con respecto a la cuota de la energía nuclear en la mix de combustibles general. Ésa es una de las razones por las que asumimos (véase el gráfico C, a continuación) que las principales ganancias del escenario de mix de combustibles más ecológica no se disfrutan hasta después del año 2025.



edificios, pasando por cambios en el comportamiento de los consumidores; por ejemplo, los hogares podrían usar “contadores inteligentes” para controlar y ajustar su consumo energético de un modo más sencillo.

Como se puede ver en el gráfico A, en este escenario, las emisiones de CO<sub>2</sub> globales alcanzarían su máximo en el año 2025 (alrededor de un 15% por encima de los niveles actuales) y a partir de ahí, se experimentaría un retroceso hasta acercarse a los niveles actuales en 2050. Este perfil de emisiones es coherente con unos niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub> en torno a las 475 ppm en el 2050, aunque esta cifra aún podría subir ligeramente (véase el gráfico B).

Para alcanzar una completa estabilización en unos niveles de 450 ppm en 2050 sería necesario reducir aún más las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta aproximadamente 1,5 GtC<sup>5</sup> en 2050, eso es lo que pensamos que puede lograrse mediante la captura y el almacenamiento de carbono en nuestro escenario de crecimiento ecológico + CCS.<sup>6</sup>

Como se ilustra en el gráfico C, esto requerirá una combinación de los tres elementos. Nuestro análisis (y el del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, la Agencia Internacional de la Energía y los principales investigadores académicos) sugiere que no será fácil, pero que se puede lograr. Mencionamos a continuación estos tres elementos:

1. El paso a un mix de combustibles que emita mucho menos CO<sub>2</sub>, con más energía nuclear y más renovables (podría más que duplicar la cuota de

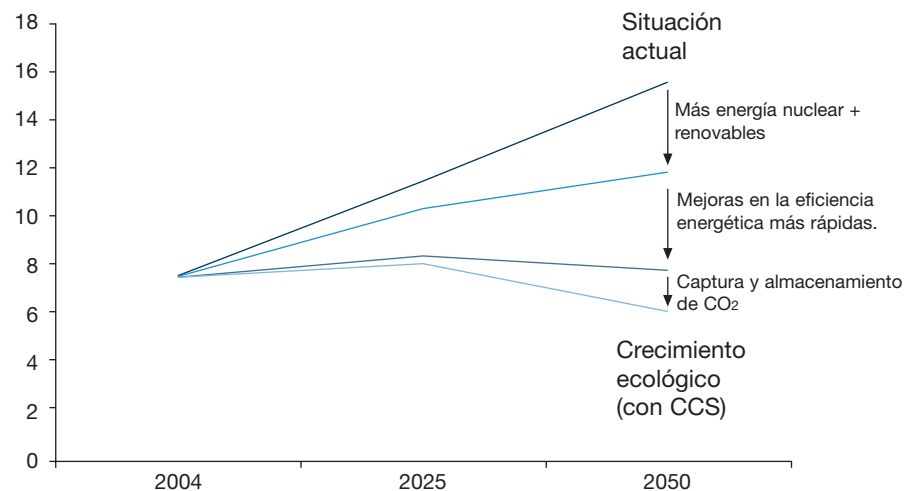
los combustibles no fósiles como energía primaria, en torno al 30% en 2050) y reduciendo los combustibles fósiles. Pensamos que esto reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub> en el año 2050 en torno a un cuarto en relación con nuestro escenario base.

2. Una reducción de la intensidad energética que supere las tendencias históricas (un 2,6% por año en lugar del 1,6% por año, lo cual reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub> en 2050 en torno a un tercio en relación con nuestro escenario base).

3. Una inversión significativa en tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCS), con una capacidad del orden de 1,5 GtC por año en 2050, lo cual reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub> un

Gráfico C: Tres pasos para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> globales a niveles sostenibles en el año 2050

Emisiones globales derivadas de combustibles fósiles (GtC pa)



Fuente: Previsiones del modelo de PwC. Estas cuatro líneas corresponden (de arriba a abajo) a nuestros escenarios de base, mix de combustibles más ecológico, crecimiento ecológico, y crecimiento ecológico + CCS. “Sostenible” aquí se entiende como ‘coherente con unas concentraciones estables de CO<sub>2</sub> atmosférico global en torno a las 450 ppm en 2050’.

5 GtC = gigatonelada de carbono.

6 Como se describe en la parte principal de este informe, este escenario se contempla dentro de las posibilidades para un desarrollo de CCS futuro que barajaba el informe especial de 2005 elaborado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC).

20% en relación con nuestro escenario de crecimiento ecológico sin CCS.

El informe también indica cómo podrían evolucionar las emisiones de CO<sub>2</sub> por país para lograr el escenario de crecimiento ecológico + CCS, según se resumen en la tabla B siguiente. Como podemos ver, las economías del G7 deberían reducir su nivel actual de emisiones a la mitad, más o menos, en 2050 para poder situarse en este escenario, mientras

que las economías del E7 aún podrían incrementar sus emisiones un 30% desde sus niveles actuales. Aunque esto varía de modo considerable si diferenciamos por países del E7: la India, por ejemplo, podría más que duplicar sus emisiones, pues actualmente presenta unos niveles relativamente bajos, pero Rusia debería reducir a la mitad sus emisiones, ya que cuenta con unos niveles relativamente elevados (teniendo en cuenta en ambos casos el PIB).

La tabla B también nos muestra el creciente peso de las economías emergentes del E7 (en especial de China y la India) en cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub> globales, en relación con las actuales economías avanzadas del G7. Según el modelo, China parece que puede superar a los EE.UU. como primer emisor de CO<sub>2</sub> en el año 2010, y las emisiones totales del E7 serían más del doble que las del G7 en 2050. Juntas, las economías de los “tres grandes” (China, EE.UU. y la India) en principio

Tabla B: Emisiones de CO<sub>2</sub> globales derivadas de combustibles fósiles por país en un escenario de crecimiento ecológico + CCS

País o grupo	Emisiones de CO <sub>2</sub> en 2004 (GtC)	Previsiones para el escenario de crecimiento ecológico + CCS			Cuota 2004 del total global (%)	Cuota 2050 del total global (%)
		Emisiones en 2050 (GtC)	% Diferencia 2004-2050			
EE.UU.	1,66	0,84	-50	22,9	13,8	
Japón	0,35	0,16	-56	4,9	2,6	
Alemania	0,23	0,10	-57	3,2	1,6	
RU	0,15	0,07	-54	2,1	1,2	
Francia	0,11	0,06	-43	1,5	1,0	
Italia	0,13	0,06	-53	1,7	1,0	
Canadá	0,16	0,07	-53	2,2	1,2	
G7 total	2,80	1,36	-51	38,6	22,5	
China	1,25	1,55	+24	17,3	25,6	
India	0,32	0,70	+118	4,4	11,7	
Brasil	0,09	0,12	+35	1,2	2,0	
Rusia	0,42	0,22	-47	5,8	3,7	
México	0,10	0,15	+47	1,4	2,5	
Indonesia	0,08	0,17	+109	1,2	2,9	
Turquía	0,06	0,09	+51	0,8	1,5	
E7 total	2,33	3,01	+29	32,1	49,8	
Otros*	2,12	1,68	-21	29,3	27,7	
Total mundial	7,25	6,05	-17	100	100	
Memo: UE 25	1,08	0,53	-51	14,9	8,8	
Memo: 3 grandes**	3,23	3,09	-4	44,6	51,1	

\*Se ha hecho una estimación ilustrativa para el 2050 a partir de una extrapolación de los datos de las 17 economías del modelo (G7, E7, España, Australia y Corea del Sur). La estimación de la UE 25 para 2050 se ha extrapolado a partir de los 5 países más grandes de la UE. En ambos casos, se han utilizado datos de 2004 como base para esta extrapolación.

\*\*EE. UU., China y la India.

Fuente: Previsiones de 2004 basadas en datos del informe BP Statistical Review of World Energy (2005) y previsiones del modelo de PwC para el escenario de crecimiento ecológico + CCS en 2050.

Se trata de emisiones de CO<sub>2</sub> estimadas a partir de combustibles fósiles únicamente (las otras emisiones se incluyen en el modelo sólo a nivel global).

serán responsables de más de la mitad de las emisiones globales en 2050, en los escenarios de base y de crecimiento ecológico + CCS (aunque los niveles absolutos de emisiones son muy inferiores en el último caso), un aumento desde el 45% actual. En cambio, y siguiendo con este escenario, la cuota de emisiones globales de la UE está previsto que se reduzca desde el 15% actual hasta el 9% en 2050.

Controlar el aumento de las emisiones en China y la India, y reducir de modo significativo el nivel de emisiones en los EE.UU. será básico para lograr los objetivos de emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial. Cabe destacar que un país como el Reino Unido (RU), a pesar de ser la quinta economía del mundo en términos de PIB a los tipos de cambio de mercado actuales, sólo responde del 2% de las emisiones de CO<sub>2</sub> globales a día de hoy, y esa cuota parece que disminuirá hasta colocarse un poco por encima del 1% en 2050.

Los países como el Reino Unido (y la UE, en general) pueden tener un papel importante en el desarrollo de nuevas tecnologías y de nuevos enfoques de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Un ejemplo lo tenemos en el régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero de la UE (en adelante, "régimen comunitario").

### Opciones tecnológicas, cuestiones políticas y conclusiones

El informe también incluye un repaso de las opciones existentes en cuanto a políticas y tecnologías en este ámbito

(véase el capítulo 4), y se sugiere que hay muchas razones para albergar un prudente optimismo en cuanto al logro de las reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> previstas en el escenario de crecimiento ecológico + CCS sin tener que pagar un coste económico prohibitivo. Las principales razones para ello son las siguientes:

- Como afirma Pacala y Socolow (2004) y la AIE (2006), existen tecnologías que pueden ofrecer unas reducciones significativas de las emisiones de CO<sub>2</sub>, aunque la mayoría de éstas aún tienen que desarrollarse para ser viables desde el punto de vista económico.
- Hay posibilidades de ampliación de los sistemas de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, según exponía el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) en su informe de 2005 en la materia.
- Se han hecho avances en la fijación del precio del CO<sub>2</sub> a escala internacional a través del régimen comunitario, y hay posibilidades de extender la aplicación (p. ej., al transporte) y el alcance geográfico del mismo con el tiempo (p. ej., relacionando el régimen comunitario con otros marcos regionales).
- Existe un gran número de estudios que demuestran que el coste de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> globales en torno a un 50-70% en relación con nuestro escenario base no debería exceder el 4-5% del PIB mundial, con un promedio de las estimaciones del 2-3% del PIB mundial, lo que equivale aproximadamente a un año de crecimiento según la tendencia actual.
- Cabe tener en cuenta los potenciales efectos del aprendizaje por la práctica: como ha quedado demostrado por los modelos desarrollados recientemente

con cambios tecnológicos inducidos (Edenhofer et al., 2006), pueden reducirse aún más las previsiones de costes, quizá en torno al 1% del PIB mundial o menos en el año 2050.

Al mismo tiempo, el análisis sugiere que no hay lugar para la complacencia porque:

- Probablemente será necesario aplicar buena parte de las mejoras de eficiencia energética indicadas en el análisis de Pacala y Socolow sólo para lograr el resultado asumido en nuestro escenario base, a pesar de que las emisiones de CO<sub>2</sub> se duplican de largo en 2050 en este escenario. Las mejoras más allá de esta base pueden ser más difíciles y costosas.
- Esto hace que sea más importante la necesidad de pasar a las alternativas de emisiones cero o a unas con tasas más bajas, pero surgen en ese caso una serie de obstáculos políticos y económicos que serán difíciles de superar, tanto para la Administración como para las empresas del sector energético. La oposición del movimiento ecologista a la energía nuclear es un buen ejemplo de ello, igual que la oposición local a los grandes proyectos hidroeléctricos y a los parques eólicos terrestres.

- A pesar de sus atractivos teóricos, los impuestos aplicados a las emisiones de CO<sub>2</sub> han topado con dificultades políticas y prácticas que a menudo han bloqueado su introducción, o van acompañados de exenciones que debilitan de modo significativo sus efectos en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Si bien el régimen comunitario ha sido todo un éxito porque ha creado un mercado, está por ver hasta qué punto los gobiernos estarán dispuestos a reducir las asignaciones futuras de derechos de emisión gratuitos, dada la posible oposición de determinados intereses comerciales y las cuestiones relacionadas con la competitividad internacional.
- Considerando los largos plazos de entrega y las largas vidas útiles de las principales inversiones de infraestructuras en el sector de la construcción, el transporte y la energía, no hay tiempo que perder a la hora de poner en marcha estrategias que disminuyan las emisiones de CO<sub>2</sub> en estas áreas si las principales reducciones de las emisiones deben hacerse notar a mediados de este siglo.
- Si bien los efectos del aprendizaje por la práctica son muy poderosos en teoría, también es cierto que no conllevan soluciones políticas fáciles. En realidad, sugieren que serán necesarias

una amplia gama de políticas que favorezcan la innovación, pero resulta difícil evaluar con precisión la efectividad que se puede lograr.

En resumen, nuestro escenario de base implica unos niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> que aumentan rápidamente y que pueden ir asociados a unos mayores riesgos de cambio climático adverso y a unos efectos socioeconómicos muy negativos a largo plazo. Al mismo tiempo, parece haber opciones de relativamente bajo coste para controlar las emisiones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y, basándose en el principio de precaución, puede resultar deseable implementarlas (parece ser bastante más “barato” que la simple contención del incremento del PIB). Quizá sea necesario que las economías más ricas de la OCDE sean pioneras en el desarrollo de nuevas tecnologías y en la reducción de sus emisiones en las dos próximas décadas, ya que no es muy realista esperar que las economías emergentes de crecimiento más rápido (como China y la India) recorten sus niveles de emisión (en vez de frenar su índice de crecimiento), pues seguramente no lo harán hasta más tarde en su proceso de desarrollo económico.

# Introducción

## El mundo en 2050: el ascenso de las economías del E7

En marzo de 2006 publicábamos un informe<sup>7</sup> sobre las perspectivas de crecimiento a largo plazo de las 17 economías más grandes del mundo en 2004, según su paridad de poder adquisitivo (PPA):

- Las economías del G7 (EE.UU., Japón, Alemania, RU, Francia, Italia y Canadá) más otras tres economías avanzadas (España, Australia y Corea del Sur).<sup>8</sup>
- Lo que llamamos “economías emergentes del E7” (China, la India, Brasil, Rusia, Indonesia, México y Turquía).

Juntas, estas economías representan alrededor del 75% del PIB mundial en términos de PPA<sup>9</sup> en 2004. En el análisis realizado en el anterior informe, preveíamos un cambio importante en el equilibrio de poderes económicos globales para el período hasta 2050.

En particular, basándonos en el PIB en términos de PPA<sup>9</sup>, nuestras previsiones de base sugerían lo siguiente:

- La economía china podía superar a la estadounidense hacia el año 2016 y ser un 23% más grande en 2025 y un 43% más grande en 2043.
- La economía india podía aumentar hasta llegar a la mitad de la economía estadounidense en 2025 y podría ponerse a su nivel en 2050.
- Brasil alcanzaría un tamaño comparable al de Alemania en 2025 y al de Japón en 2050.
- Indonesia (que cuenta con el cuarto índice demográfico del mundo) y México tienen potencial para ponerse al nivel de Italia en 2025 y para superar al Reino Unido y Alemania en 2050.
- Rusia podría tener una escala similar a la del Reino Unido y Francia a partir

de 2025, aunque posiblemente no avanzara mucho más a partir de ahí porque la demografía no le acompañaría, y Turquía tiene potencial para ponerse al nivel de Italia en 2050.

- Las economías del E7 en su conjunto podrían ser un 20% más grandes que el G7 en 2025, y un 75% más grandes en 2050.

Evidentemente, al hablar tan a largo plazo, las incertidumbres son inevitables y estos datos deberían verse como una posibilidad, no como previsiones precisas. Algunas de las economías del E7 podrían incluso obtener mejores resultados de lo esperado, pero otras podrían no lograr materializar su potencial, debido a la combinación de inestabilidades políticas, errores en políticas económicas y problemas medioambientales. De hecho, las estimaciones hechas partían de la base de que el entorno económico global acompañaba al crecimiento, sobre todo en cuanto a evitar una recaída en el proteccionismo.

Sin embargo, la conclusión de que el E7 será cada vez más importante en la economía mundial en el período hasta 2050, y de que China, y más tarde la India, se enfrentarán a los EE.UU. por el liderazgo económico mundial, parece una idea bastante fundamentada, salvo que se produzca algún tipo de catástrofe global.

En términos económicos, también argumentábamos que esto debería ser beneficioso no sólo para el E7, donde cientos de millones de personas deberían haber salido de la pobreza en 2050, sino también para las asentadas economías de la OCDE, que se benefi-

7 J. Hawksworth, *The World in 2050: How big will the large emerging economies get and how can the OECD compete?*, PricewaterhouseCoopers, marzo de 2006.

8 En adelante, “Corea”.

9 A los tipos de cambio de mercado, tenían un 80% del PIB mundial en 2004, pero la medida del PPA es un indicador más adecuado para el consumo de energía y por tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por ello, en el presente informe nos centramos en el indicador del PPA del PIB.

ciarían tanto de las importaciones más baratas del E7 como del hecho de que, teniendo en cuenta que las economías emergentes serían más prósperas, cada vez habría más mercados de exportación en esos países. Y ello en un momento en que, posiblemente, la demanda interna de los países de la OCDE se habría reducido por el envejecimiento de su población.

Esta conclusión relativamente optimista dependía, claramente, de que las economías de la OCDE mantuvieran la flexibilidad suficiente para trasladar los recursos a sus áreas de ventaja comparativa, y que invirtieran de modo continuo en mejorar su capital humano por medio de la educación y formación. También dependía de que se evitaran las presiones políticas a corto plazo en cuanto a respuestas proteccionistas al crecimiento del E7.

### Implicaciones para el consumo de energía global y las emisiones de CO<sub>2</sub>

Existe un área clave, donde el ascenso del E7 y el asociado rápido crecimiento global se pueden ver como algo menos positivo desde una perspectiva global: nos referimos a las implicaciones para el consumo de energía global y, por ende, para las emisiones de CO<sub>2</sub><sup>10</sup> y el cambio climático.

Hemos experimentado fuertes incrementos en los precios del petróleo en los últimos años. Si bien se reconoce que esos movimientos de precios están relacionados con la capacidad de suministro de Oriente Medio y las

demás zonas productoras, también se sabe que reflejan el rápido incremento de la demanda energética de China y la India, sobre todo en los últimos años. El papel de Rusia como suministrador de gas a Europa también ha llamado la atención recientemente.

Por otro lado, se presta cada vez más atención al cambio climático, y se sabe que, aunque los EE. UU. y Europa son ahora los principales emisores de CO<sub>2</sub>, China, la India y otras economías del E7 pueden convertirse en un futuro en los principales emisores de CO<sub>2</sub> (si se mantiene la tendencia actual). En concreto, como el E7 avanza con rapidez en su proceso de industrialización, sus economías tenderán a consumir más energía que las economías asentadas de la OCDE, cada vez más orientadas al sector servicios. Al mismo tiempo, muchos pueden argumentar que no sería justo esperar que el E7 se prive de determinadas ventajas del rápido crecimiento económico para solucionar el problema de las emisiones de CO<sub>2</sub> causado en los doscientos años anteriores por las economías asentadas de la OCDE, a menos que esos países también emprendan determinadas acciones para reducir sus propias emisiones.

En este informe pretendemos cuantificar algunas de estas cuestiones por medio del modelo de previsiones del PIB para las 17 economías cubiertas en nuestro anterior estudio (hecho a nivel global). Esa es nuestra base para establecer las previsiones globales<sup>11</sup> de consumo de energía primaria y de emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de los com-

bustibles fósiles con arreglo a una serie de supuestos sobre el crecimiento económico, la intensidad energética, la mix de combustibles y la intensidad de emisiones de CO<sub>2</sub>. También ilustramos cómo estos escenarios de emisiones de CO<sub>2</sub> pueden redundar en tendencias a largo plazo en los niveles atmosféricos de dióxido de carbono. Esto, a su vez, nos lleva al análisis de las implicaciones de una serie de posibles respuestas políticas y tecnológicas que podrían requerir que los niveles de dióxido de carbono atmosféricos se mantuvieran dentro de unos límites razonables.

Basándonos en el pensamiento científico actual, interpretamos que los “límites razonables” significa que debería controlarse el riesgo de posibles aumentos de temperatura a nivel mundial de más de 2 °C (en relación con los niveles preindustriales). Aunque sigue habiendo importantes incertidumbres sobre cómo cuantificar de modo preciso estos riesgos y lo que es exactamente un nivel “aceptable” de riesgo, 2 °C es el nivel aproximado de calentamiento global sobre el cual cada vez son más los análisis científicos<sup>12</sup> que sugieren que pueden producirse severos efectos adversos derivados del cambio climático. Entre estos efectos encontramos el aumento del nivel del mar, con la inundación de las áreas costeras; la mayor frecuencia de temporales extremos; el posible impacto en la Corriente del Golfo; la alteración de sectores agrícolas tradicionales, sobre todo en los países en vías de desarrollo; sequías en áreas con fuertes subidas de temperatura; ame-

10 En general, nos centramos en este informe en las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con el uso de los combustibles fósiles, si bien hay otros elementos que también influyen en los niveles de dióxido de carbono de la atmósfera (los sumideros de CO<sub>2</sub> naturales, como los bosques y los océanos), así como otros gases de efecto invernadero, como el metano y el óxido nítrico, que también tienen incidencia en el cambio climático. Pero en general se acepta que las emisiones de dióxido de carbono son las más importantes, con diferencia, en ese sentido (son responsables del 75% o más de los gases de efecto invernadero cuando se agregan en términos de equivalente en CO<sub>2</sub>) y ciertamente, no habrá política de cambio climático efectiva si no se reducen estas emisiones. Eso no significa que no haya otras áreas importantes (p. ej., la reforestación), pero justifica que nos centremos en las emisiones de CO<sub>2</sub> en el presente informe, lo cual es habitual en la literatura de investigación económica de este campo.

11 Nuestras previsiones podrían verse como versiones simplificadas de las producidas por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) para su informe de 2001 sobre el reto global del cambio climático (aunque con datos actualizados para reflejar lo acontecido desde 2001). Si bien la mayor sencillez de nuestro informe comporta alguna pérdida de detalle, tiene ventajas que compensan en términos de claridad y transparencia.

12 Véase, por ejemplo, el debate en IPCC (2001) y AIE (2006).



nanzas a la biodiversidad; posibles efectos si las altas temperaturas reducen la capacidad de los océanos, del suelo y de los bosques de actuar como sumideros naturales de dióxido de carbono, de modo que se magnificaría todo efecto climático negativo inicial, etc.

### Estructura del informe

El resto del informe sigue la estructura siguiente:

- Capítulo 1: Describe la metodología del modelo utilizado, los supuestos básicos y los escenarios alternativos que se tratan en el informe.
- Capítulo 2: Presenta y analiza las previsiones de crecimiento económico global y el consumo de energía primaria (en totales y por tipo de combustible) hasta el año 2050 y en los distintos escenarios.

- Capítulo 3: Presenta y analiza las previsiones en cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub> y a los niveles atmosféricos de dióxido de carbono a nivel global, asociados con cada uno de los escenarios, y lo relaciona con pruebas de base científica sobre los posibles efectos en los niveles de la temperatura global y otros aspectos del cambio climático.
- Capítulo 4: Repasa algunas de las opciones políticas y tecnológicas para controlar las emisiones de CO<sub>2</sub> en el futuro sin restringir de modo indebido el potencial crecimiento de la economía mundial.

Los resúmenes de los resultados básicos y las conclusiones se pueden encontrar al final de los capítulos 2, 3 y 4 del informe, así como en el resumen ejecutivo anterior. Para más detalles técnicos de la metodología del modelo de crecimiento económico, véase el anexo.

La bibliografía se lista al final del informe.

# Metodología, supuestos de base y escenarios alternativos

## 1.1 Enfoque metodológico

El gráfico 1.1 que encontramos a continuación resume la estructura de nuestro modelo.

Los supuestos básicos de cada elemento del modelo se tratan a continuación. Los lectores que no estén interesados en los pormenores metodológicos pueden saltarse esta parte y pasar a la descripción de los escenarios alternativos, en el apartado 1.7 (pág. 27) y, a continuación, proceder directamente al estudio de los resultados de cada escenario, en los capítulos 2 y 3 del informe.

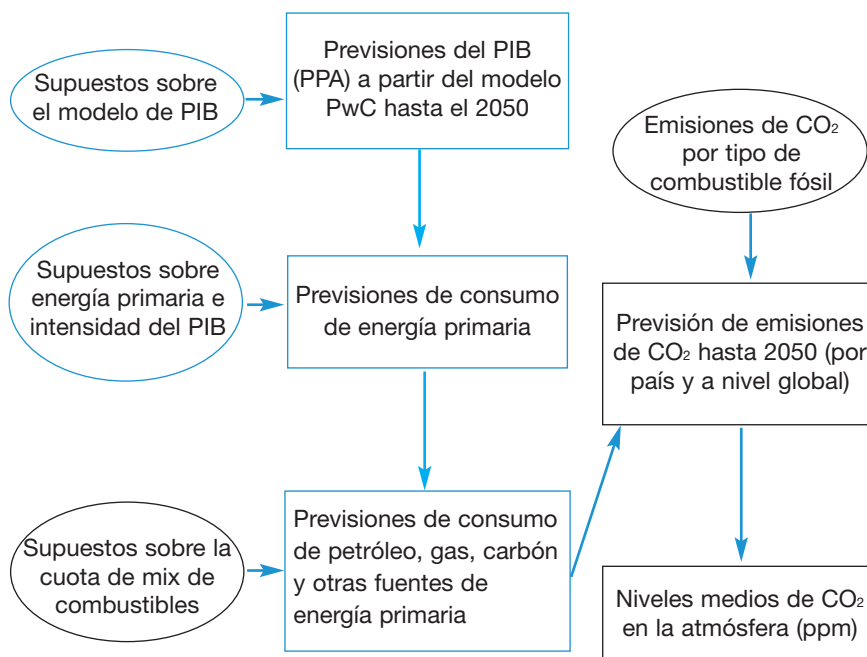
## 1.2 Previsiones de crecimiento del PIB

El primer nivel del modelo mostrado en el gráfico 1.1 es el mismo que utilizamos en nuestro último informe El mundo en el 2050. Se trata de un modelo de crecimiento que es habitual<sup>13</sup> en la literatura económica, y se describe con más detalle en el anexo.

Los motores clave del crecimiento del PIB en este modelo son los siguientes:

- Inversión en stock de capital físico (neto de depreciación).
- Nivel de formación, que dirige las tendencias en la calidad de las aportaciones laborales (lo que a veces llamamos “nivel medio de capital humano por trabajador”).
- Crecimiento de la población activa (basándonos en las últimas cifras de las Naciones Unidas), lo que determina la cantidad de aportación de trabajo.
- Progreso tecnológico, que se supone que en parte está dirigido por el aumento de la productividad de los

Gráfico 1.1: Resumen de la estructura del modelo



Nota: Todas las previsiones se han hecho por país y luego se han agregado para la visión global.

EE.UU. y en parte por las tasas de recuperación específicas por país con respecto a los niveles de productividad de los EE.UU.<sup>14</sup>

Se aplica el modelo a cada uno de los 17 países estudiados de modo individual, aunque sus tasas de crecimiento están relacionadas entre sí por el supuesto del crecimiento de la productividad de los EE.UU.<sup>14</sup>, que determina la “frontera tecnológica global” del modelo. Los supuestos del modelo (dejando de lado las tendencias demográficas a partir de las previsiones demográficas de 2004 de las NU) se basan en una extrapolación hecha a partir de las tendencias históricas específicas de cada país en cuanto a tasas de inversión y niveles de formación, y a partir de supuestos plausibles,

como el modo en que las tasas de recuperación de la productividad varían según los países.

A corto plazo, por ejemplo, asumimos que las tasas de recuperación (para una brecha de productividad inicial concreta) son de un 1,5% por año para China, que cuenta con políticas económicas que favorecen el crecimiento desde hace 25 años, pero sólo del 0,5% para la India e Indonesia, que se encuentran en un estadio más inicial de su desarrollo a este respecto.

Más allá del año 2030, asumimos que las tasas de recuperación convergen en las economías emergentes a un 1,5% anual, lo que coincide con las previsiones del 1-2% de la literatura académica<sup>15</sup> sobre las tendencias

<sup>13</sup> Más concretamente, asumimos una función de producción Cobb-Douglas con rendimientos de escala constantes y la participación de capital en la producción de un tercero.

<sup>14</sup> Aquí por “productividad” nos referimos al crecimiento del total de los factores de productividad.

<sup>15</sup> Véase, por ejemplo, el debate de la literatura académica sobre las tasas de crecimiento económico comparadas: Barro (1997) o Miles y Scott (2004).

pasadas en una amplia serie de economías que aplican políticas muy favorecedoras al crecimiento económico (p. ej., estabilidad macroeconómica, apertura al comercio exterior y a la inversión, y un régimen regulador y legal predecible y razonablemente estable).

No es necesario que el entorno político sea perfecto en todos los sentidos, pero sí debería apoyar la construcción de redes comerciales del país y las relaciones de inversión con la economía mundial, de modo que sea capaz de afrontar los avances de la tecnología global.

Muchos países en vías de desarrollo (sobre todo en África y en algunas partes de América Latina en el pasado) no han apoyado esos entornos políticos favorables, pero nuestro modelo asume de modo implícito que las economías del E7 seguirán por la buena vía en ese sentido, a pesar de que puedan darse los inevitables altibajos en el proceso con el tiempo, debido a los ciclos económicos, a la inestabilidad política temporal y a períodos de estasis política.

Al mismo tiempo, el modelo asume de modo implícito que no van a volver a haber políticas proteccionistas a nivel global, como las que ayudaron a descarrilar el crecimiento en los años treinta, aunque es evidente que éste es un riesgo claro.

El modelo permite calcular el crecimiento del PIB real según los tipos de cambio (USD constantes) o según el índice de paridad de poder adquisitivo (PPA). El primer indicador es mejor en cuanto al tamaño futuro potencial y actual de los mercados del E7 desde la perspectiva de los EE.UU. o las empre-

sas europeas que operan en dólares, euros o libras esterlinas. Para el propósito que nos ocupa, sin embargo, estamos más interesados en el volumen de la producción de las economías del E7, ya que es lo que va a determinar el consumo de energía y, por tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub>, y el PIB en términos de PPA parece más apropiado en nuestro caso. Asumimos que los tipos de cambio de la PPA se mantienen constantes en el tiempo en términos reales.<sup>16</sup>

Nuestro modelo produce previsiones del incremento del PIB para las que actualmente son las 17 economías más grandes del mundo en términos de PPA (según datos de Banco Mundial para 2004). Luego se calculan los niveles globales suponiendo que su cuota mundial del PIB sigue constante a un 75%. Esto refleja el hecho de que, aunque algunas de las economías más pequeñas de la OCDE pueden crecer menos rápidamente que la media de los 17 países considerados en el modelo, muchas de las economías más pequeñas en desarrollo pueden crecer más rápido (en especial en regiones como Asia, Europa del Este y partes de América Latina; las previsiones para África no están tan claras, pero su cuota con respecto al PIB mundial es, en cualquier caso, pequeña). Este supuesto quizá no sea adecuado, pero centrarse en las 17 economías más grandes hace que el análisis sea manejable y puede dar una indicación adecuada de las tendencias futuras.

### 1.3 Consumo total de energía primaria

El siguiente paso del modelo, según se ilustra en el gráfico 1.1, es estable-

<sup>16</sup> En términos de USD, los tipos de cambio de mercado de las economías emergentes en principio deberían aumentar de modo gradual con el tiempo, ya que los niveles de precios se ajustan a los niveles de la OCDE conforme va creciendo su nivel de ingresos; pero este efecto no tiene por qué preocuparnos en estos momentos.

Tabla 1.1: Tendencias históricas en intensidad de energía primaria

% Cambio pa en ratio de consumo de energía primaria / PIB	Media todos los años disponibles (1981-2004)	Media últimos diez años (1995-2004)	Media últimos cinco años (2000-2004)
EE.UU.	-2,0	-2,0	-1,9
Japón	-0,8	-0,4	-1,2
Alemania	-2,2	-1,4	-1,0
RU	-2,0	-2,2	-2,2
Francia	-0,7	-0,9	-1,2
Italia	-0,7	0,2	-0,1
Canadá	-1,3	-2,0	-1,4
España	-0,2	0,5	0,0
Australia	-0,9	-1,4	-1,7
Corea	0,5	-0,1	-1,5
<b>Economías del E7</b>			
China	-4,1	-2,8	3,3
India	-0,2	-1,3	-1,4
Brasil	0,9	0,9	-0,7
Rusia	-1,3*	-3,3	-5,0
México	0,1	-0,3	-0,6
Indonesia	1,3	1,8	-0,4
Turquía	1,0	0,1	-0,5
Media mundial	-1,6%	-1,7%	-1,1%

\*En Rusia sólo disponemos de datos entre 1992 y 2004. Los primeros años de ese período también son un poco extraños, debido a la fuerte caída del PIB ruso durante los primeros noventa, tras la caída de la URSS. Fuente: Cálculos de PwC basados en los datos sobre el PIB del FMI y sobre el consumo de energía primaria del informe BP Statistical Review of World Energy (2005).

cer supuestos sobre las tendencias relacionadas con la intensidad de la energía primaria (p. ej., el ratio de consumo de energía primaria con respecto al PIB) de cada país. Se podría hacer un modelo más detallado de las relaciones entre el crecimiento del PIB y los diferentes elementos de la demanda de energía intermedia o final, como la generación de electricidad, el transporte, otros usos comerciales o industriales y otros usos domésticos. Pero esto requeriría un modelo mucho más complejo de la oferta y demanda global de energía,<sup>17</sup> y no aportaría mucho al análisis en términos de la magnitud de uso de energía primaria, aunque podría ayudar a informar de los supuestos de de combustibles (por ejemplo, porque la demanda en el transporte se basa sobre todo en el petróleo, mientras que el uso del carbón se mueve en el sector de generación de electricidad). A este respecto, destacaríamos que los principales escenarios desarrollados por el IPCC en el 2001 no indicaban grandes variaciones entre 2000 y 2050 en el ratio de demanda de energía final (incluyendo la generación de electricidad) para el consumo de energía primaria.

Al establecer el modelo para la intensidad de energía primaria, nuestro punto de partida era un análisis de las tendencias históricas desde principios de los años ochenta basadas en datos del informe BP Statistical Review of World Energy (2005),<sup>18</sup> según se resume en la tabla 1.1 siguiente.

Como se puede ver en la tabla 1.1, en términos globales, la intensidad de la energía primaria global ha retrocedido en una media en torno a un 1,6% por año en el período 1981-2004 y la media para los últimos diez años también ha sido similar, un 1,7%. Los últimos cinco años han conocido un declive más lento en intensidad energética, con una media de sólo el 1,1% anual, pero se debe sobre todo a un excepcional aumento experimentado en China, como se explicará más adelante.

Algunos países (p. ej., los EE.UU., con un -2% anual) han dado muestras de una tendencia histórica bastante estable en intensidad de energía primaria si se tiene en cuenta la media a 5, 10 ó 24 años. Para las economías del G7, más Australia, también se detecta una tendencia bastante cohe-

rente hacia una disminución de la intensidad energética en el período 1981-2004, con tipos medios de retroceso que van del -0,7% anual en Francia e Italia al -2,2% anual en Alemania. Esto refleja el cambio de sus economías al sector servicios, y ello, en toda la OCDE, y los incentivos por lograr una mayor eficiencia energética a causa de los elevados precios del petróleo en los años setenta y principios de los ochenta.

España ha quedado rezagada en este sentido, con un retroceso medio en intensidad de energía primaria de tan sólo un 0,2% anual desde 1981 y un incremento en los últimos diez años, lo que quizá refleja el hecho de que estaba en fase de recuperación en su crecimiento económico. Lo mismo puede decirse de Corea hasta hace poco, aunque su intensidad de energía primaria ha retrocedido un 1,5% anual en los últimos cinco años, una media cercana a la de la OCDE.

Volviendo a las economías del E7, las tendencias han sido mucho más dispares, tanto por países como por período. Teniendo en cuenta su tamaño, China adquiere una especial importancia en este caso, y como se ilustra en el gráfico 1.2, recientemente ha experimentado una marcada aceleración en el consumo de energía primaria en relación con el incremento del PIB en 2002-2004, después de un fuerte retroceso en el consumo de energía primaria a finales de los noventa y una tendencia generalizada previamente a estar por debajo del incremento del PIB en la mayoría de los años desde principios de los ochenta hasta mediados de los noventa.

<sup>17</sup> PwC ha trabajado con este tipo de modelo de energía detallado en otros proyectos; es un área, pues, en que se podría incidir con más detalle en el futuro.

<sup>18</sup> También tuvimos en cuenta las Key World Energy Statistics (2005) de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) pero, en general, los datos eran similares en las dos fuentes, y el informe de BP cubría un año más (2004 / 2003).

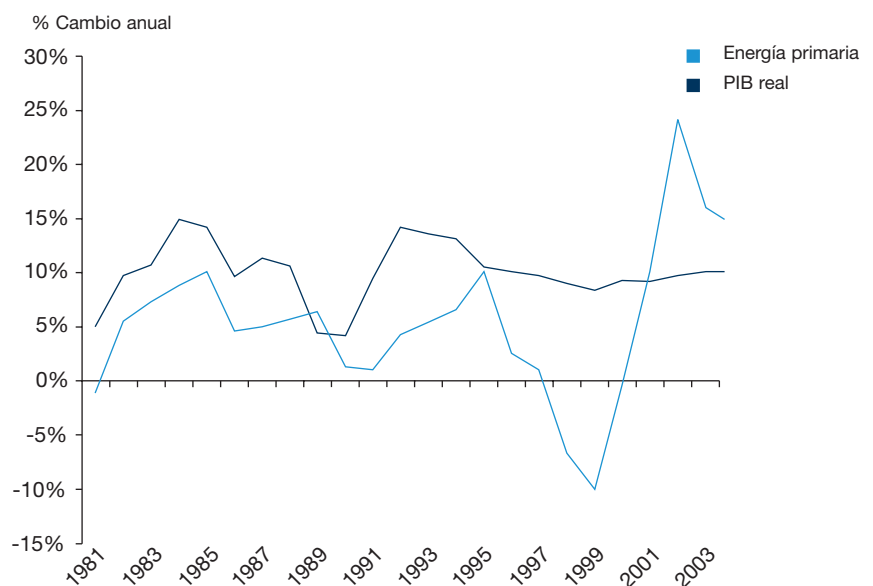
El crecimiento excepcionalmente rápido del consumo de energía primaria chino, que sigue muy centrado en el carbón, aunque se ha ido moviendo de modo gradual hacia el petróleo y el gas natural, parece que va a mantener el ritmo a corto plazo. En parte podría incorporar una corrección a la baja a finales de los noventa y, a más largo plazo, podríamos esperar una relación más normal para reafirmarse<sup>19</sup> con el aumento del consumo de energía primaria, con una tendencia a situarse por debajo del incremento del PIB, aunque seguramente no tanto como en los ochenta y noventa. Estos supuestos generales se reflejan en el escenario de base que se describirá a continuación.

Para la India, el otro gigante potencial en emergencia, el patrón ha sido bastante distinto, según se ilustra en el gráfico 1.3.

Para el período en general, el consumo de energía primaria se ha situado en una media de sólo 0,2% anual menor que el crecimiento del PIB real, aunque la tendencia en los diez últimos años ha sido más favorable, con un retroceso medio de la intensidad de energía primaria del 1,3% anual para el período. Por todo ello, decidimos basarnos en este último período para nuestras previsiones futuras.

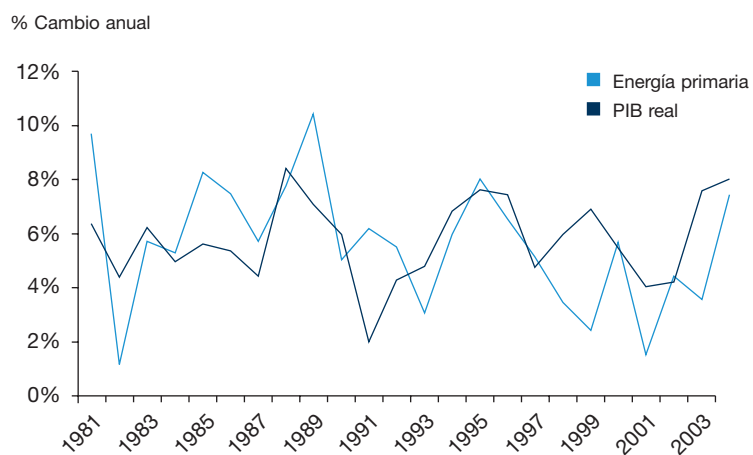
Brasil también ha visto un cambio importante en su intensidad de energía primaria en los últimos cinco años, como se ve en la tabla 1.1, y asumimos que esta tendencia más favorable se mantiene en nuestro escenario base. También destacamos en nuestro escenario base la mejora de la intensidad de energía primaria en los últimos cinco años en México, Indonesia y

Gráfico 1.2: Incremento del PIB y consumo de energía primaria



Fuente: Cálculos de PwC basados en los datos del FMI del PIB y en los datos sobre consumo de energía primaria de BP.

Gráfico 1.3: Incremento del PIB y consumo de energía primaria en la India



Fuente: Cálculos de PwC basados en los datos del FMI del PIB y en los datos sobre consumo de energía primaria de BP.

<sup>19</sup> Sobre todo gracias a un reciente cambio de actitud del Gobierno chino, que parece que da más importancia a la eficiencia energética, en respuesta a las limitaciones de oferta y a la escalada de los precios energéticos.

Turquía (con una media del 0,5% anual en los tres países en 2000-2004).

Rusia es un caso menos claro, porque su consumo de energía primaria inicial era muy elevado en relación con su peso económico, pero ha retrocedido más rápidamente que en los otros países en los últimos diez años, pero sobre todo en los últimos cinco años (véase la tabla 1.1). Sin embargo, el promedio del 5% anual de retroceso en intensidad energética en el período 2000-2004 parece poco probable que sea sostenible mucho tiempo, por ello asumimos que esta tasa de retroceso se va desacelerando de modo gradual en el período hasta 2010 y entonces se sitúa en torno al 2% anual, algo similar a las normas de países de la OCDE, como los EE.UU.

La tabla 1.2 establece los supuestos hechos sobre la intensidad de energía primaria en nuestras previsiones de base a la luz de lo dicho anteriormente. Estos supuestos pretenden representar una “business as usual” en la que la tendencia global media en general en cuanto a intensidad de energía primaria es del 1,6% anual en el período 2005-2050, la misma que la media histórica de 1981 a 2004. Después del 2025, partimos de que esto es uniforme en todos los países, porque no parece razonable predecir tendencias específicas por país relativas a la intensidad de energía primaria más allá de esa fecha. Hasta 2025, sí dibujamos supuestos concretos para cada país e intentamos ver cómo las tendencias históricas se pueden proyectar en el futuro, inicialmente en una base de transición hasta 2010 y luego con una base más estable en el período 2011-2025.

Evidentemente, hay muchas incertidumbres en torno a los supuestos realizados; varían según los escenarios alternativos que iremos comentando.

#### 1.4 Supuestos relativos al mix de combustibles

El mix de combustibles es importante porque las emisiones de dióxido de carbono varían de modo significativo según el tipo de combustible: el carbón es el que presenta una mayor intensidad de CO<sub>2</sub>, seguido por el petróleo y el gas natural. Otras formas de energía primaria (p. ej., la nuclear o la renovable) tienden a tener un grado mucho menor de intensidad de CO<sub>2</sub>, o incluso una presencia nula.

El punto de partida para nuestros supuestos de mix de combustibles es la cuota estimada de diferentes combustibles en el total de consumo de energía primaria de cada país en 2004, según se establece en la tabla 1.3.

Podemos ver que casi todas las grandes economías estudiadas siguen siendo muy dependientes de los combustibles fósiles para cubrir sus necesidades energéticas. Las únicas excepciones significativas son Francia —que cuenta con un importante programa basado en energía nuclear— y Brasil y Canadá, donde la energía hidroeléctrica proporciona una fuente de energía significativa. Pero incluso en estos tres países, en torno a un 56% y un 68% de la energía primaria se

Tabla 1.2: Supuestos del escenario base en cuanto a la intensidad de energía primaria

% Cambio anual	2005-2010	2011-2025	2026-2050
EE.UU.	-2	-2	-1,6
Japón	-0,8	-0,8	-1,6
Alemania	1,4	-1,4	-1,6
RU	-2	-2	-1,6
Francia	-0,9	-0,9	-1,6
Italia	Desde -0,1 en 2005 a -0,7 en 2010	-0,7	-1,6
Canadá	-2	-2	-1,6
España	-0,2	-0,2	-1,6
Australia	-1,4	-1,4	-1,6
Corea	-1	-1	-1,6
<b>Economías del E7</b>			
China	Desde +3 en 2005 a -2 en 2010	-2	-1,6
India	-1,3	-1,3	-1,6
Brasil	-0,7	-0,7	-1,6
Rusia	Desde -4,5 en 2005 a -2 en 2010	-1,6	
México	-0,5	-0,5	-1,6
Indonesia	-0,4	-0,4	-1,6
Turquía	-0,5	-0,5	-1,6
<b>Media mundial</b>	<b>-1,1</b>	<b>-1,6</b>	<b>-1,6</b>

Fuente: Supuestos de PricewaterhouseCoopers (la media mundial es output del modelo más que un input).



Tabla 1.3: Cuota de consumo de energía primaria por tipo de combustible en 2004

% Cuota del total	Petróleo	Gas natural	Carbón	Otros
EE.UU.	40,2	25,0	24,2	10,6
Japón	46,9	12,6	23,5	17,0
Alemania	37,4	23,4	25,9	13,3
RU	35,6	38,9	16,8	8,7
Francia	35,8	15,3	4,8	44,2
Italia	48,7	35,9	9,3	6,0
Canadá	32,4	26,2	9,9	31,5
España	53,3	16,9	14,5	15,3
Australia	32,6	18,6	45,7	3,1
Corea	48,3	13,1	24,4	14,2
<b>Economías del E7</b>				
China	22,3	2,5	69,0	6,2
India	31,7	7,7	54,5	6,1
Brasil	44,9	9,1	6,1	40,0
Rusia	19,2	54,1	15,8	10,8
México	58,6	29,8	6,2	5,4
Indonesia	49,9	27,6	20,3	2,2
Turquía	37,5	23,3	27,0	12,2
<b>Media mundial</b>	<b>36,8</b>	<b>23,7</b>	<b>27,2</b>	<b>12,3</b>

Fuente: BP Statistical Review of World Energy (2005).

"Otros" se refiere a energía nuclear, hidroeléctrica y otras energías renovables.

obtiene de combustibles fósiles, mientras que en el resto de países ese porcentaje supera el 80%. Otras formas de energía renovable (p. ej., la energía eólica o solar) no hacen aportaciones significativas actualmente a las necesidades energéticas de estas economías.

En relación con las economías del E7, el punto más importante que cabe destacar es la fuerte dependencia en el carbón que tiene la India (54,5%) y también China (69%), aunque el petróleo también está cada vez más presente en ambos países (y el total de combustible fósil alcanza casi el 94% en ambos casos). Esto es un dato importante, porque significa que el rápido crecimiento de China y la India estará dominado en un futuro previsible por las formas de energía que producen más CO<sub>2</sub>: el carbón y el petróleo. De hecho, el uso del gas natural se está incrementando, pero parte de una base muy poco importante, sobre todo en China. Por su parte, la energía hidroeléctrica está aumentando su presencia en China, pero los principales proyectos realizados en ese país han creado puntos de desconfianza entre los locales por su incidencia medioambiental.

A nivel global, la cuota de mix de combustibles de energía primaria no ha variado tanto en los últimos diez años, aunque esto enmascara algunos cambios importantes en varias direcciones a nivel nacional. La tabla 1.4 resume algunas de estas tendencias en cuanto al aumento del consumo de energía relativo por tipo de combustible en las cinco mayores economías de la OCDE y las economías emergentes del E7.

A nivel global, la tendencia más coherente es un aumento de la presencia

Tabla 1.4: Crecimiento del consumo de energía primaria por tipo de combustible en las grandes economías seleccionadas (1995-2004, % anual)

% Crecimiento pa	Petróleo	Gas natural	Carbón	Total energía primaria
EE.UU.	1,5	0,6	1,2	1,5
Japón	-0,8	1,8	4,0	0,7
Alemania	-0,9	2,4	-1,1	0,0
RU	-0,1	4,0	-2,6	0,6
Francia	0,5	3,8	-0,9	1,4
<b>Economías del E7</b>				
China	7,8	8,9	4,7	5,5
India	6,1	6,8	4,3	4,8
Brasil	2,6	15,3	1,0	3,3
Rusia	-2,4	0,3	-1,8	-0,5
México	0,7	5,9	7,2	2,5
Indonesia	4,0	2,1	16,5	4,9
Turquía	2,2	12,9	2,7	4,3
Mundo	1,7	2,6	2,4	2,1
<b>OCDE</b>	<b>1,0</b>	<b>2,2</b>	<b>1,1</b>	<b>1,3</b>
<b>Economías emergentes (excl. Rusia)</b>	<b>3,8</b>	<b>6,1</b>	<b>4,4</b>	<b>4,3</b>

Fuente: BP Statistical Review of World Energy (2005).

del gas natural a expensas del petróleo, aunque los Estados Unidos representan una notable excepción en ese sentido, con un aumento relativamente bajo del gas natural. El paso al gas se hace especialmente visible en la Unión Europea, donde Alemania, Francia y el Reino Unido muestran cifras de consumo de gas que aumentan con una relativa rapidez, a expensas del declive del carbón y (a excepción de Francia) del petróleo en los diez años hasta 2004. Sin embargo, como últimamente los precios del gas han subido incluso más que los del petróleo, no está claro cuánto va a durar esta “carrera por el gas” en Europa.

A nivel global, el consumo de carbón también ha crecido bastante rápido en este período, más que el total de energía primaria. Y parece que esto se lo debemos a la combinación de un crecimiento relativamente rápido en el consumo de carbón de algunas de las grandes economías asiáticas, sobre todo Japón e Indonesia, y al incremento de la cuota relativa del consumo de energía global de China y la India, que siguen siendo muy dependientes del carbón, como ya se ha dicho anteriormente (a pesar de un modesto retroceso de la cuota de carbón con respecto a su consumo energético primario total desde 1994). Dado que es el combustible que desprende más CO<sub>2</sub>, la continua presencia del consumo del carbón en la mayoría de regiones del mundo (exceptuando Europa) plantea un problema obvio desde el punto de vista climático.

Mirando hacia el futuro, se barajan unas incertidumbres considerables en cuanto a las tendencias futuras del mix de combustibles mundial, y ello

depende, en particular, de lo siguiente:

- Tendencias en la composición de la demanda energética intermedia y final (generación energética, transporte y otros usos).
- Precio relativo de los diferentes tipos de combustible, que dependerán de las tendencias del lado de la oferta en el sector de extracción energética: hasta qué punto las nuevas tecnologías facilitarán que el petróleo y el gas se extraigan de un modo más económico, de modo que se reduzcan los miedos de que las reservas viables económicamente hayan agotado las existencias de petróleo en el 2050 y de que se hayan empeorado seriamente las reservas de gas natural).<sup>20</sup>

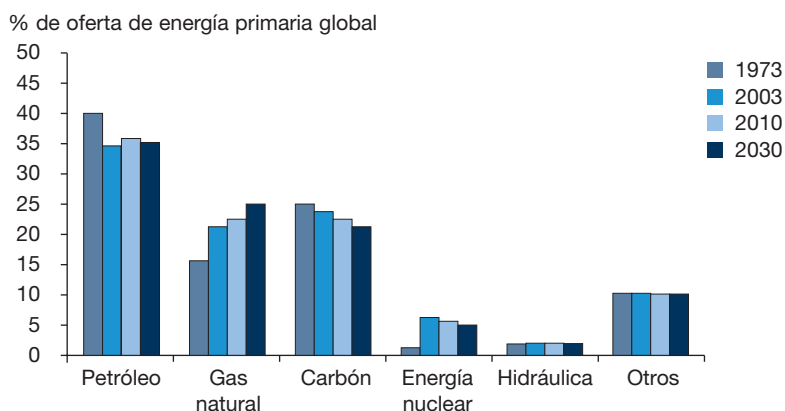
Los escenarios de cambio climático del Panel Intergubernamental del IPCC 2001 tienen en cuenta casi todas las combinaciones posibles de tendencias en mix de combustibles en el siglo XXI: desde un cambio significativo hacia el gas y/o las energías renovables a una vuelta al carbón porque las reservas de

gas disminuyan y las energías renovables no salgan a cuenta económicamente. De hecho, podemos encontrar una visión de consenso en el principal escenario del informe de 2005 World Energy Outlook, de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), según se resume en el gráfico 1.4 en relación con la cuota de mix de combustibles.

El gráfico 1.4 incluye las previsiones de la AIE de cómo han cambiado las cuotas de mix de combustibles entre 1973 y 2003. En reflejo de la fuerte subida de los precios del petróleo en 1973-1974 y de nuevo en 1979-1980, la cuota del petróleo cae en torno a un 45% del total de energía primaria hasta situarse en un 35% aproximadamente,<sup>21</sup> pues se compensa con las crecientes cuotas de gas natural y energía nuclear. Se registran pocos cambios en la cuota de carbón, la hidráulica u otras renovables entre 1973 y 2003 a nivel global.

Mirando hacia el futuro, las previsiones de la AIE respecto del escenario base sugieren sólo unos cambios relativa-

Gráfico 1.4: Cuota de mix de combustibles en la oferta de energía primaria a nivel mundial: últimas previsiones del escenario principal de la AIE



Fuente: AIE (2005)

<sup>20</sup> BP preveía la existencia de reservas de petróleo por unos 40 años a finales del año 2004, con los niveles de producción del momento, y reservas de gas natural por unos 67 años. Las reservas aseguradas de carbón a nivel global, en cambio, se espera que duren al menos otros 160 años con los niveles de producción actuales. Es evidente que se pueden descubrir nuevas reservas que amplíen estos plazos, o que los avances tecnológicos en materia de extracciones pueden alargar la vida de estas reservas. Ahora bien, teniendo en cuenta que las limitaciones a largo plazo en las reservas implican una vuelta del petróleo y el gas al carbón para la generación energética a largo plazo, es evidente que esto no son buenas noticias para las emisiones de CO<sub>2</sub>, a menos que se creen medidas para desarrollar las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono. Esta opción se comenta en el capítulo 4.

mente modestos en la cuota de combustible para el período hasta 2030. Se espera que el gas natural aumente su cuota sólo 4 puntos porcentuales desde 2003 a 2030, compensada por declives de unos 2 puntos porcentuales en las cuotas de carbón y energía nuclear. No se esperan cambios significativos en las cuotas de petróleo,<sup>22</sup> la hidroeléctrica u otras energías renovables.

Teniendo en cuenta que las emisiones de CO<sub>2</sub> del gas natural están en un punto intermedio entre las del carbón y las de la energía nuclear, el efecto neto de este cambio en el mix de combustibles con respecto al aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> es poco probable que sea importante según las previsiones de la AIE. Además, el paso al gas previsto, basándose en el trabajo de principios de 2005, quizá requiera un cierto replanteamiento, a la vista de los recientes y rápidos incrementos de precios del gas y la visión de los mercados de que buena parte de este incremento puede durar bastante, para el gas, pero también para el petróleo. Si esto es así, el declive previsto para el carbón y la energía nuclear en favor del gas quizá no alcance las previsiones de la AIE.<sup>23</sup>

A partir de las incertidumbres implicadas en las previsiones de mix de combustibles a largo plazo y nuestra atención en el presente informe a las implicaciones de uso energético para las emisiones de CO<sub>2</sub> y el cambio climático a nivel mundial, hemos decidido que en nuestro escenario base no cambien las cuotas de combustible en lo referente al consumo de energía primaria de cada país. Esto no pretende ser una estimación del resultado más

probable para el futuro (aunque sí está dentro de los resultados posibles), pero tiene ventajas de presentación, pues nos permite explorar las implicaciones para las emisiones de CO<sub>2</sub> de las diferentes mix de combustibles y hacer un análisis de los escenarios en relación con el escenario de base “sin cambios/habitual”. Dado que aplicamos un supuesto de mix de combustibles constante por país, en cambio, aún nos permite unos efectos composición a nivel global si los países con un crecimiento más rápido tienden más a un tipo de combustible concreto: la alta recurrencia al carbón en China y la India tienen una importancia significativa en este caso, según se comenta en el apartado 2.3.

### 1.5 Del uso energético a las emisiones de CO<sub>2</sub>

En nuestro escenario base, usamos los siguientes factores de conversión estándar, basados en los usados en el Informe de 2001 del IPCC, para ir del uso de los combustibles fósiles a las emisiones de CO<sub>2</sub>:

- Carbón: 0,001032 gigatoneladas de carbono (GtC) por millón de toneladas equivalentes de petróleo (mtoe);
- Petróleo: 0,000794 GtC por mtoe; y
- Gas natural: 0,000576 GtC por mtoe.

En otras palabras, el petróleo produce aproximadamente un 75% de CO<sub>2</sub> con respecto al carbón para unidades comparables, y el porcentaje del gas natural está en torno al 55% de media. En la práctica, estos factores de conversión variarán según el tipo de carbón y petróleo, pero parecen ser unos supuestos medios razonables y,

21 La estimación de la AIE está ligeramente por debajo de los 36,8% puntos que estima BP para el petróleo en el Statistical Review of World Energy (2005), según se muestra en la tabla 1.3 y nuestro modelo. Esto refleja una mayor definición de otras energías primarias en los datos de la AIE, pero tiene pocas consecuencias para las previsiones actuales de emisiones de CO<sub>2</sub>.

22 En el caso del petróleo, esto refleja una demanda energética del sector del transporte que se anticipa relativamente rápida y se parte de la base de que, al menos hasta el año 2030, no serán viables a gran escala desde el punto de vista económico los sustitutos de los combustibles basados en el petróleo para este sector (como las células de combustible de hidrógeno).

23 Aunque ese efecto podría derivarse del legado que nos han dejado las decisiones tomadas en el pasado con respecto a no construir nuevas plantas de energía nuclear y de carbón en los noventa.

junto con nuestra base de datos para energía primaria por tipo de combustible, ofrecen una estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub> totales a nivel mundial derivadas de combustibles fósiles de unas 7,2 GtC en 2004, lo que coincide con las previsiones de otras fuentes.

### 1.6 Desde las emisiones de CO<sub>2</sub> a los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub>

Con vistas a estimar las modificaciones de temperatura global potencial y los efectos de cambio climático asociados, es necesario establecer supuestos sobre lo siguiente:

- Tendencias en las emisiones de CO<sub>2</sub> de los combustibles no fósiles en relación con las modificaciones en el uso de la tierra.
- Dimensiones actuales del sumidero de CO<sub>2</sub> natural de océanos, bosques y otros elementos de la biosfera que eliminan el CO<sub>2</sub> de la atmósfera y lo almacenan (y tendencias en ese sentido).

Las previsiones de estos factores varían de modo significativo, y explorarlas nos llevaría a áreas científicas que se escapan del alcance de este estudio. Para el presente informe, por lo tanto, adoptaremos los mismos supuestos simplificados utilizados en Retallack (2005):

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> de los combustibles no fósiles disminuyen de modo constante, a partir de las estimaciones actuales de aproximadamente 1 GtC (p. ej., en torno a una séptima parte de las emisiones de combustible fósil) hasta más o menos cero en 2050; este escenario coincide ampliamente

con muchos de los escenarios considerados en el informe IPCC de 2001, la mayoría de éstos tendían a conocer un declive gradual de las emisiones de CO<sub>2</sub> netas de esta fuente.

- El sumidero de CO<sub>2</sub> natural se supone que estaba en torno a las 4,2 GtC en el 2004, y que disminuye gradualmente hasta situarse en 4,1 GtC en 2050 (y 4 GtC en el 2100, para cálculos ilustrativos a más largo plazo).

Partiendo de las últimas estimaciones de que las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera estaban en torno a las 376 partes por millón (ppm) en 2003 (en comparación con los niveles preindustriales, en torno a las 280 ppm), podemos hacer una estimación de cómo esto cambia con el tiempo mediante la fórmula siguiente:<sup>24</sup>

$$\text{Cambio en ppm} = (\text{Total emisiones de CO}_2 - \text{sumidero natural}) * 0,47$$

Por ejemplo, con un total de emisiones de CO<sub>2</sub> estimadas en 8,2 GtC y el sumidero natural a 4,2 GtC en 2004, esto se traduce en un incremento de  $4 * 0,47 = 1,88$  ppm en 2004, con un aumento del dióxido de carbono atmosférico desde 376 ppm a justo por debajo de 378 ppm. Esto ilustra el hecho de que, sin una reducción significativa de las emisiones de CO<sub>2</sub> totales o un incremento significativo del sumidero de CO<sub>2</sub> natural (p. ej., mediante un importante programa de reforestación), se producirá un lento pero inexorable incremento de los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub>.

Relacionar los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub> con los cambios de temperatura global conlleva una serie de incertidumbres científicas, además de ten-

dencias relativas a otros gases con efecto invernadero, como el metano (aunque normalmente se acepta que son menos significativas para el cambio climático que el CO<sub>2</sub>). Pero el Informe del IPCC de 2001 y el análisis consiguiente, según el resumen de Retallack (2005), sugieren que las posibilidades de mantener a largo plazo la temperatura de superficie principal a nivel mundial con un aumento inferior a los niveles de los 2 °C, que es lo que en general se considera<sup>25</sup> coherente para que los efectos en el cambio climático no sean tan severos (aunque eso no quiere decir que no sean significativos), serían las siguientes:

- un 80% si los niveles de CO<sub>2</sub> se estabilizan en torno a las 400 ppm;
- un 50% si los niveles de CO<sub>2</sub> se estabilizan en torno a las 450 ppm; y
- un 20% si los niveles de CO<sub>2</sub> se estabilizan en torno a las 550 ppm;

Pacala y Socolow (2004) se centran en un objetivo de estabilización en torno a las 500 ppm (basándose en su visión del consenso científico en ese momento) y argumentan, basándose en los resultados de la literatura de investigación y en algunos modelos sencillos, que es necesario que las emisiones globales de los combustibles fósiles se mantengan cerca de los niveles actuales hasta más o menos el año 2050, con un retroceso gradual de las emisiones a más largo plazo. Lo que ellos plantean para lograr este objetivo se explica con más detalle en el capítulo 4, pero lo principal es que el equilibrio de las pruebas científicas recientes parece sugerir que este objetivo de estabilización de las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de combustibles fósiles es el mínimo que se podría

<sup>24</sup> Extraído del anexo 2 de Retallack (2005).

<sup>25</sup> Para ver más pruebas científicas sobre el aumento de temperatura de 2 °C, véase IPCC (2001) y Stern (2006). El informe actualizado del IPCC, en principio, y según los informes de los medios, reforzará los argumentos de mantener la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> en unos niveles lo suficientemente bajos para que los aumentos de temperatura no superen los 2 °C en el equilibrio de probabilidades.

desea para 2050 si se quiere reducir el riesgo de dañar severamente el clima a más largo plazo. Esto ayuda a poner en contexto el debate consiguiente, que muestra fuertes tendencias al alza de las emisiones de CO<sub>2</sub> si no se imponen actuaciones compensatorias concretas.

### 1.7 Descripción de los diferentes escenarios

Para el presente informe nos hemos centrado en un escenario base y en cinco escenarios más en que se produce la variación de uno o más supuestos, según se resume en la tabla 1.5 siguiente. Es evidente que no se contemplan todos los posibles resultados futuros, pero sí se logra ilustrar la trayectoria de cada uno de los escenarios con respecto a la emisión de CO<sub>2</sub> con los supuestos clave. La explicación de los datos para el

escenario base se ha tratado en detalle más adelante. Se presenta como un escenario que pretende reflejar la situación actual sin cambios, con un incremento del PIB global que sigue nuestras previsiones de referencia, la intensidad energética mejora en la línea de las tendencias de los años ochenta y el mix de combustibles se mantiene en unos niveles constantes. No se plantea como una previsión de lo que es probable que suceda, sino más bien como una indicación de lo que puede suceder, de continuar por el camino actual.

El escenario desfavorable es uno en que la tasa de mejora de la intensidad energética está en el extremo más bajo de lo considerado plausible por el IPCC en sus previsiones de 2001 y en torno a un 1% anual por debajo de las medias experimentadas desde los años ochenta. Puede ir asociado a un significativo retroceso de los precios de los

combustibles fósiles como resultado de descubrimientos importantes de reservas de petróleo y gas y/o de avances tecnológicos significativos que posibiliten la extracción de reservas que antes no eran viables desde el punto de vista económico.

En un mundo en que la energía derivada de combustible fósil parece relativamente barata y abundante, los incentivos para obtener mejoras de eficiencia energética rápidas pueden ser limitados, en especial si se trata de un período en que las evidencias de calentamiento global son menos claras y en que hay relativamente pocos ejemplos de estar perjudicando al clima. Esto puede llevar a un período de complacencia sobre la necesidad de controlar las emisiones de CO<sub>2</sub>, en especial, quizá en las economías emergentes que se están industrializando a un ritmo muy rápido, y que suelen prio-

Tabla 1.5: Diferentes escenarios

Escenario	Media de crecimiento del PIB real a nivel mundial (% pa 2005-2050 / PPA)	Cambio medio de la intensidad energética mundial (% pa 2005-2050 / PPA 2005-2050)	Tendencias del mix de combustibles
Base	3,2*	-1,6	Sin cambios en las cuotas de 2004 para cada país
Desfavorable	3,2*	-0,6	Sin cambios en las cuotas de 2004 para cada país
Mix de combustible más ecológico	3,2*	-1,6	En cada país, la cuota de carbón cae un 0,1 ppt anual hasta 2025, y luego un ppt anual hasta 2050. La cuota de petróleo disminuye 0,3 ppt anuales hasta 2050; la cuota de gas natural aumenta 0,2 ppt anuales hasta 2025 y a partir de ahí, se estabiliza; la cuota de renovables aumenta para compensar estos cambios
Crecimiento ecológico	3,2*	-2,6	Igual que en el escenario del mix de combustible más ecológica
Crecimiento ecológico + captura y almacenamiento de CO <sub>2</sub> (CCS)	3,2*	-2,6	Igual que en el escenario del mix de combustible más ecológico, pero con una reducción adicional en las emisiones de CO <sub>2</sub> debido a la mejora del CCS hasta 1,5 GtC hasta 2050.
Crecimiento limitado	2,6 (la productividad de los EE. UU. disminuye un 0,25% pa; las tasas de recuperación del E7 disminuyen un 0,5% pa hasta el 2020 y un 1% pa a más largo plazo)	-1,6	Sin cambios en las cuotas de 2004 para cada país

\*El incremento del PIB en todos estos escenarios es como en el caso del escenario de base del informe de PwC de marzo de 2006 El mundo en el 2050. Fuente: Hipótesis de PricewaterhouseCoopers.

rizar el crecimiento económico por encima de las preocupaciones medioambientales.

No se trata del peor de los casos en términos absolutos desde la perspectiva de las emisiones de CO<sub>2</sub>, pero está en la parte más pesimista del espectro, aunque desde una perspectiva de crecimiento económico convencional pueda parecer un escenario relativamente benigno. En cualquier caso, el mundo estaría almacenando potencialmente problemas medioambientales, que serían más serios en el futuro, de seguir por esa vía.

El escenario con un mix de combustible más ecológico es una variante de nuestro escenario base pero, como el nombre lo indica, hay un paso hacia el gas natural (hasta 2025) y en especial hacia las energías renovables (en el período hasta 2050) a expensas del carbón y del petróleo. En concreto, la cuota de energía nuclear y renovables con respecto a los incrementos de energía primaria totales en este escenario pasa desde el 12,3% en 2004 (usando los datos de BP descritos anteriormente) hasta el 30% en 2050, mientras que la cuota de petróleo cae del 36,8% en 2004 a sólo un 21% en 2050. Sin embargo, las tendencias de incremento del PIB y de intensidad de energía primaria se mantienen invariables en este escenario, que es un ejemplo de lo que se puede llegar a avanzar en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> sólo variando el mix de combustibles de un modo plausible.

El escenario de crecimiento ecológico va más allá, asumiendo el mismo cambio hacia los combustibles con baja emisión de CO<sub>2</sub> que en el escenario anterior, pero también asume que la tasa de retroceso en la intensidad de energía primaria se incrementa con una media del 1% anual (p. ej., desde -1,6% a -2,6% anual). Este planteamiento, en realidad, es más optimista que ninguno de los escenarios centrales considerados en el informe del IPCC de 2001 y por lo tanto, supone un reto relativamente importante.

En el capítulo 3, presentamos una variante de este escenario llamada de crecimiento ecológico + CCS, que introduce los posibles efectos de CO<sub>2</sub> (CCS) a nivel global (con asignaciones prorrateadas por país). Más concretamente, asumimos que la cantidad anual de CO<sub>2</sub> capturado y almacenado va mejorando desde las cifras actuales, cercanas a cero, hasta aproximadamente 1,5 GtC en 2050. Como se trata más adelante en el capítulo 4, es probable que éste sea un elemento importante en cualquier estrategia para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en este período de tiempo, y la magnitud del efecto en este escenario está en una gama plausible según se indica en un reciente informe especial elaborado por el IPCC (2005) sobre este tema. Pero persisten obstáculos importantes para la realización de este potencial, como se ha tratado en el capítulo 4 siguiente.

Los cinco escenarios anteriores usan las mismas previsiones de crecimiento

del PIB de base que en nuestro informe "The World in 2050", que conlleva un crecimiento del PIB global promedio con PPA de aproximadamente un 3,2% anual. En el escenario de crecimiento limitado, consideramos cómo las emisiones de CO<sub>2</sub> quedarían afectadas por una posible reducción de esta tasa de crecimiento económico global a 2,6%, lo que afectaría a todos los países, también a las economías emergentes, con unas tasas de recuperación de productividad más lentas. Mantenemos los supuestos sobre intensidad energética y mix de combustibles igual que en nuestro escenario de base con vistas a aislar el impacto del crecimiento económico diferencial.

Evidentemente, podrían considerarse muchas otras variantes o combinaciones de estos escenarios con nuestro modelo, pero en los próximos dos capítulos del informe limitamos nuestro análisis a estos seis escenarios principales con vistas a hacer que el análisis y los comentarios sean manejables. El capítulo 2 se centra en distintas previsiones de consumo de energía primaria por tipo de combustible, y el capítulo 3 repasa las previsiones de emisiones de CO<sub>2</sub> y de niveles de concentración de CO<sub>2</sub> en atmósfera asociadas a los distintos escenarios. Por fin, en el capítulo 4, los resultados del modelo actúan como marco para debatir diferentes opciones políticas y tecnológicas.



# Crecimiento económico y consumo de energía en los diferentes escenarios

## 2.1 Crecimiento económico

En la tabla 2.1 que presentamos a continuación aparecen nuestras previsiones de base para el crecimiento del PIB real medio anual por país y globalmente para el período de 2005 a 2050, junto con el escenario de crecimiento limitado descrito anteriormente.

Nuestras previsiones de base se describían en detalle en nuestro informe de marzo de 2006 El mundo en 2050, por lo que a continuación sólo comentamos las características clave:

- En términos globales las economías emergentes del E7 se prevé que crecerán casi el doble de rápido que las del G7 en el período hasta 2050 (aunque esta brecha de crecimiento se cerrará con el tiempo, cuando las economías del E7 también empiecen a madurar y cuando las posibilidades que permiten la rápida tasa de recuperación a través de imitación tecnológica se hayan agotado).
- Debido en gran parte a su demografía más favorable, la India crecerá más rápido que China a largo plazo.<sup>26</sup> La destacada desaceleración del crecimiento chino también refleja nuestro punto de vista de que las fuertes inversiones hechas recientemente (45% del PIB o más) no son sostenibles a largo plazo.
- Entre las economías del E7, Brasil, Indonesia, México y Turquía se beneficiarán de una demografía relativamente favorable, pero en Rusia sucederá lo contrario. Corea del Sur no está incluida en el E7 debido a sus mayores ingresos per cápita, pero también experimenta una decaída muy acusada de su población activa.

• A este nivel, más que diferencias en el crecimiento de la productividad, los diferenciales entre las economías del G7 acusan grandes diferencias demográficas, lo cual afecta a las tendencias de suministro de mano de obra. Italia y Japón está previsto que se sitúen a la cola de la lista de crecimiento debido al fuerte declive de su población activa.

Como se decía en el apartado anterior, nuestro escenario de crecimiento limitado combina una modesta reducción del crecimiento de la productividad global que afecta a todos los países, con una reducción más específica en la velocidad de recuperación de las economías del E7. Esto explica por qué,

Tabla 2.1: Crecimiento previsto del PIB real en los distintos escenarios: 2005-2050 (% pa)

País	Escenario base	Escenario de crecimiento limitado	Diferencia
India	5,2	4,0	-1,2
Indonesia	4,8	3,6	-1,2
Turquía	4,2	3,5	-0,7
China	3,9	3,1	-0,8
Brasil	3,9	3,2	-0,7
México	3,9	3,3	-0,6
Rusia	2,7	2,0	-0,7
Australia	2,7	2,5	-0,2
Canadá	2,6	2,4	-0,2
Corea S.	2,4	2,2	-0,2
EE.UU.	2,4	2,2	-0,2
España	2,2	2,0	-0,2
RU	2,2	2,0	-0,2
Francia	2,2	2,0	-0,2
Alemania	1,8	1,6	-0,2
Italia	1,6	1,4	-0,2
Japón	1,6	1,4	-0,2
Mundo*	3,2	2,6	-0,6
G7 total	2,2	2,0	-0,2
E7 total	4,2	3,3	-0,9

\*Se asume que estas 17 economías tienen una cuota constante del 75% con respecto al total del PIB mundial según PPA, en línea con las previsiones del Banco Mundial de 2004.  
Fuente: Previsiones de incremento del PIB de PricewaterhouseCoopers (redondeadas a la cifra más cercana a 0,1%).

<sup>26</sup> En particular, la población activa de la India, según las Naciones Unidas, debe crecer en torno al 1% anual entre 2005 y 2050, mientras que la de China en principio disminuirá aproximadamente un 0,5% anual en el mismo período, debido sobre todo a su política en materia de reproducción.

según la tabla 2.1, el crecimiento del G7 es sólo un 0,2% anual más bajo en este escenario, mientras que el crecimiento del E7 es un 0,9% anual más bajo en promedio. Las economías del E7, con el índice de crecimiento previsto más rápido de nuestro caso base, como la India, muestran las reducciones más destacadas en nuestro escenario de crecimiento limitado. Hay, por supuesto, muchos otros escenarios de crecimiento posibles que podríamos haber considerado, pero esto responde al propósito de ilustrar cómo los diferentes supuestos sobre el crecimiento económico se relacionan con el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Mientras que la reducción del crecimiento medio del PIB global en nuestro escenario de crecimiento limitado gira en torno al 0,6%, el efecto acumulativo es reducir el tamaño previsto de la economía mundial en 2050 en casi un cuarto: pasar de unos 250 billones de dólares a unos 190.000 millones de dólares (precios de 2004). La cuota estimada del E7 con respecto al PIB mundial (según PPA) en 2050 también disminuye, y pasa de aproximadamente un 45% en nuestro escenario base a un 40% en el caso de crecimiento limitado, aunque esta cifra sigue siendo positiva considerando la de la cuota estimada del E7 en 2005, en torno al 30%.

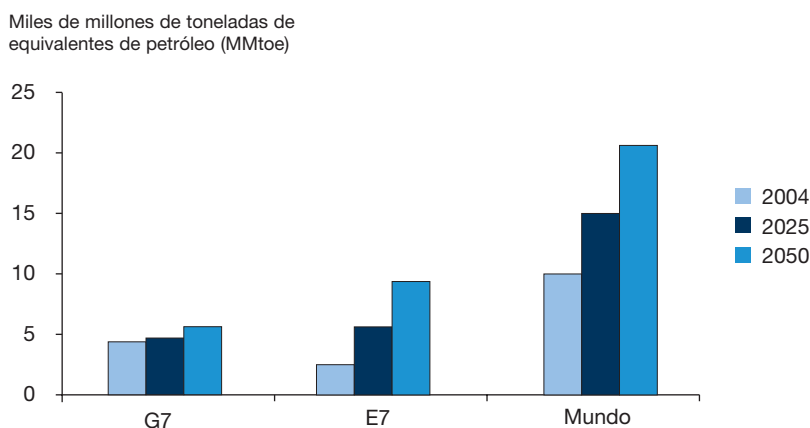
## 2.2 Escenarios de consumo de energía primaria

En nuestro escenario base, las supuestas mejoras de eficiencia energética implican que el consumo de energía primaria global sólo aumenta una media de un 1,6% anual en el período hasta 2050, aproximadamente

la mitad de la tasa de crecimiento mundial del PIB (3,2% de media en el mismo período). Sin embargo, esto sigue implicando que el consumo de energía primaria global es más del doble: pasa de 10.200 millones de toneladas equivalentes de petróleo (toe) en 2004 a casi 21.000 millones de toe en el 2050.

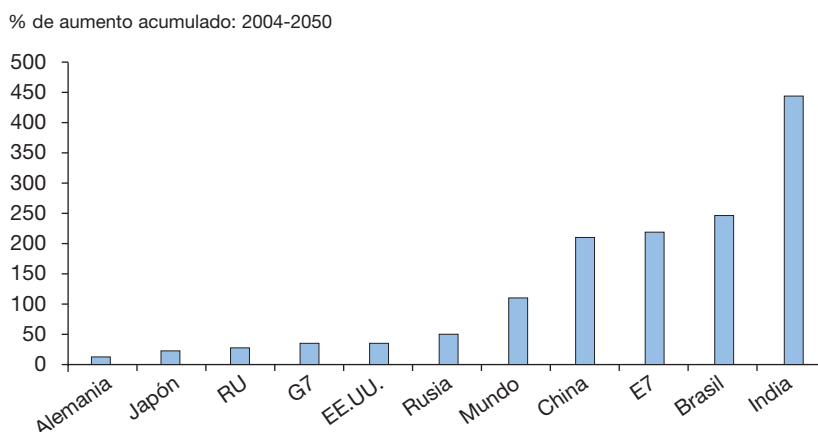
Vale la pena destacar que nuestras previsiones de base muestran un incremento del consumo de energía primaria global a casi 16.300 millones de toe en el 2030, lo que se acerca mucho a las perspectivas de base del World Energy Outlook de la AIE 2005, en torno a los 16.500 millones de toe para ese año. Esto ofrece algo de seguridad de que

Gráfico 2.1: Previsiones de base para el consumo de energía primaria



Fuente: Datos del BP Statistical Review para 2004; previsiones del modelo de PwC para los últimos años.

Gráfico 2.2: Aumento previsto del consumo de energía primaria en el escenario de base



Fuente: Previsiones del modelo de PwC

el enfoque de modelo simplificado adoptado en este estudio está produciendo resultados plausibles y comparables a los de modelos más complejos, como el de la AIE.

Como se puede ver en el gráfico 2.1, esta tendencia global enmascara diferencias significativas entre las economías avanzadas asentadas y los mercados emergentes.

Para el consumo de energía primaria en las economías del E7, está previsto un incremento acumulado del 216% (2,5% anual) en 2050, en comparación con el incremento de sólo el 32% (0,6% anual) de nuestro escenario base para el G7.

La cuota del E7 de consumo de energía primaria global aumenta desde justo por debajo del 30% en el año 2004 a un 45% aproximadamente en 2050. El E7 representa en torno al 60% del incremento total del consumo de energía primaria global para el período hasta 2050 en nuestro escenario de base.

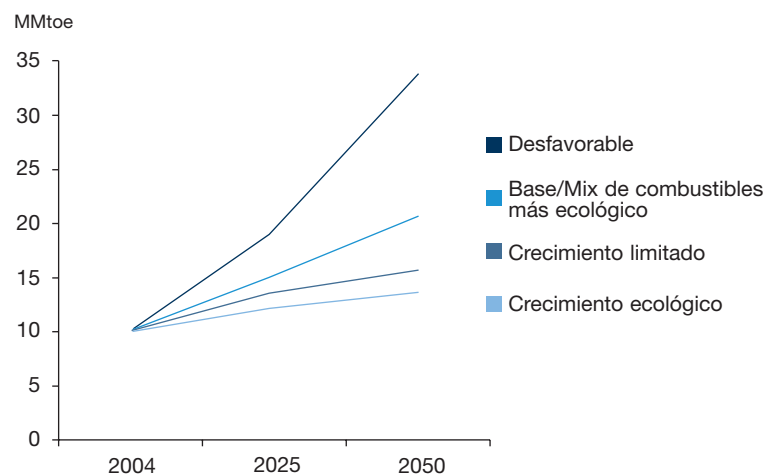
Estos resultados para el G7 y el E7 disfrazan variaciones más importantes de estos grupos. Para las 17 grandes economías consideradas en este estudio, el incremento acumulativo en el consumo de energía primaria en 2050 varía desde justo el 16% en Alemania a un 442% en la India en nuestro escenario base (véase el gráfico 2.2 para ver los resultados por países concretos). Los EE.UU. quedan ligeramente por encima de la media del G7, con un 34%, mientras que China se sitúa al nivel de la media del E7, en un 205%.

El consumo de energía primaria de nuestro escenario con un mix de com-

bustible más ecológica es el mismo que el del escenario base, pero varía en los otros tres escenarios ilustrados en el gráfico 2.3 a nivel global. Podemos ver que, aun en el escenario de crecimiento ecológico,<sup>27</sup> con reducciones de la intensidad energética del 1% anual mayores que la tendencia histórica, hay un incremento de aproximadamente un 30% en el consumo de energía primaria entre 2004 y 2050, aunque esto disminuye desde el 106% de incremento previsto en nuestro escenario base.

La cuota del E7 en consumo de energía primaria aumenta y la del G7 disminuye en todos los escenarios (véase la tabla 2.2), aunque estas tendencias son menos marcadas en el escenario de crecimiento limitado, donde la tasa de recuperación económica del E7 se supone más lenta que la de los otros cuatro escenarios. Cabe destacar, en cambio, que la cuota de consumo de energía primaria del E7 ya está en unos niveles relativamente ele-

Gráfico 2.3: Consumo de energía primaria global en los diferentes escenarios



Fuente: Datos de BP para 2004; previsiones del modelo de PwC para los últimos años.

<sup>27</sup> Las previsiones de consumo de energía son las mismas en el escenario de crecimiento ecológico y en el de crecimiento ecológico + CCS, por lo que no diferenciamos los resultados por separado para estos últimos en este apartado.

Tabla 2.2: Cuotas de consumo de energía primaria global en el G7 y el E7 según los diferentes escenarios

Escenarios	Cuota de economías del E7 (%)		Cuota de economías del G7 (%)	
	2004	2050	2004	2050
Base	29	44	41	26
Desfavorable	29	44	41	26
Mix de combustibles más ecológico	29	44	41	26
Crecimiento limitado	29	39	41	30
Crecimiento ecológico*	29	45	41	26

\*Los resultados son los mismos para el escenario de crecimiento ecológico + CCS.  
Fuente: Datos de BP para 2004; previsiones del modelo de PwC para 2050.

vados (29%) y por lo tanto, sólo aumenta a aproximadamente un 44-45% en los cuatro escenarios, según nuestras previsiones de crecimiento económico.

### 2.3 Consumo de energía primaria por tipo de combustible

Nuestro modelo nos permite hacer proyecciones de consumo de energía primaria por tipo de combustible. La figura 3.4 ofrece los incrementos pre-

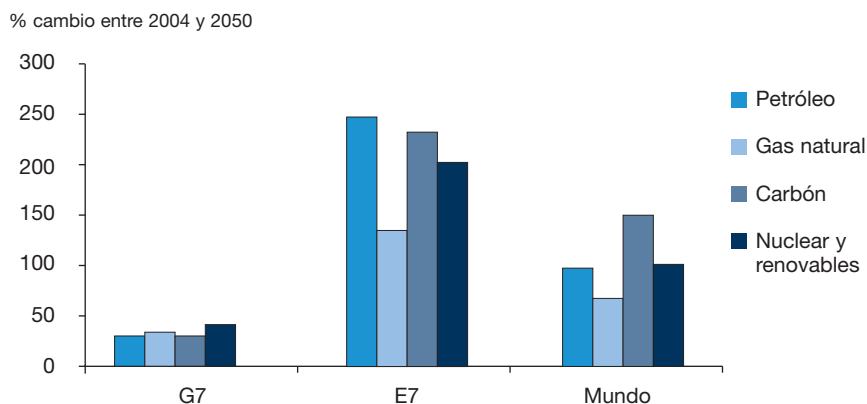
vistos en el consumo global, del G7, y del E7 para los cuatro tipos principales de combustible de nuestro modelo hasta el 2050.

Las previsiones ilustran de nuevo el crecimiento mucho más rápido en todos los tipos de combustible del E7 en comparación con el G7. Mientras que los aumentos acumulativos del G7 entre 2004 y 2050 son bastante similares, en torno al 30% en todos los tipos de combustible, se detectan diferencias más destacadas para el grupo E7,

que también se traducen en diferencias de crecimiento significativas por tipo de combustible a nivel global. Esto es porque, como se describe en el capítulo 2, aplicamos nuestro supuesto de base de un mix constante de combustibles a nivel nacional (se aplica a cada país por separado), pero aún permite efectos de composición al hacer agregados al E7 o a nivel global si el consumo de energía está creciendo mucho más rápido en términos absolutos en algunas de estas economías que en otras, y si el mix de combustibles varía de modo significativo en las distintas economías.

El factor clave en este caso es que la China y la India, que son con diferencia las economías más grandes del E7 en términos de PPA (y a largo plazo, también serán más grandes que las demás economías, con la única salvedad de los EE.UU.), hacen un uso relativamente elevado del carbón (y en menor medida, del petróleo, aunque seguramente se disparará la demanda de este último conforme se vaya generalizando el uso de coches y otros vehículos de motor en estas economías emergentes), más que de gas natural, en particular. Esto tiende a empujar el crecimiento previsto del consumo del carbón en relación con el de otros tipos de combustibles en nuestro escenario base, según se ilustra en el gráfico de columnas 2.4. De nuevo, es preciso destacar que el escenario de base se contempla como un punto de partida para el análisis, no se trata de una previsión: en la práctica, se podrían esperar transferencias desde el carbón al gas natural y a otros combustibles en China y la India, igual que se ha considerado en otros escenarios. El gráfico 2.5 ilustra cómo el creci-

Gráfico 2.4: Aumento previsto del consumo de energía primaria por tipo de combustible en las previsiones de base



Fuente: Previsiones del modelo de PwC con arreglo al escenario base.

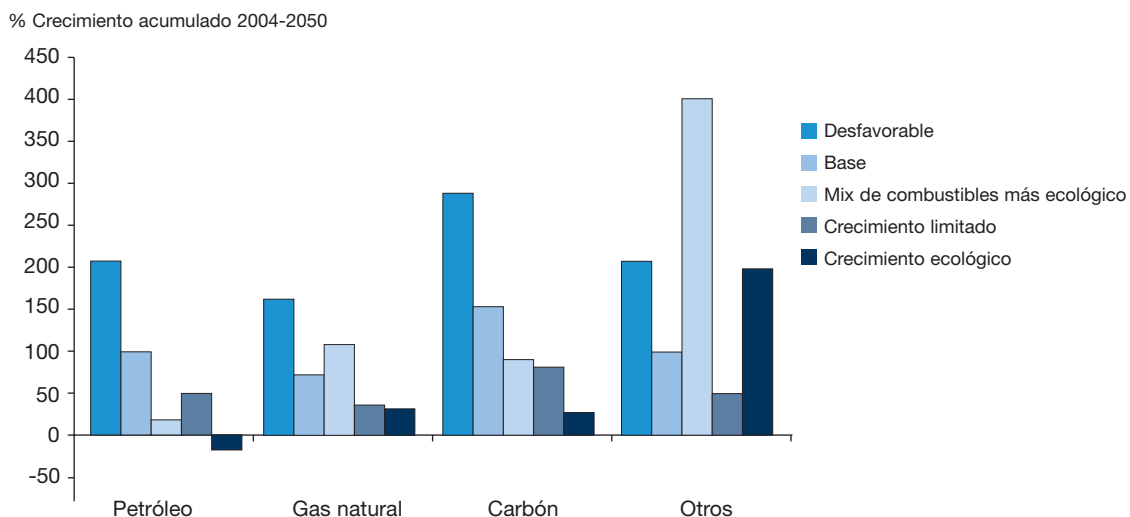
miento acumulado previsto a nivel global para los distintos tipos de combustibles varía en los diferentes escenarios en el período hasta 2050.

Podemos ver que hay diferencias muy importantes entre los distintos escenarios. El escenario desfavorable implica incrementos en el consumo de combustible fósil a una escala que, dejando de lado toda implicación de orden medioambiental, parecería incoherente con las actuales previsiones de las reservas disponibles de petróleo y, en menor grado, de gas natural. A menos que se produzcan fuertes mejoras tecnológicas que reduzcan los costes de extracción de modo significativo y que creen una gran cantidad de reservas para el futuro (lo que hoy es inviable), ese rápido crecimiento en el consumo en principio debería hacer que los precios de los combustibles fósiles aumentaran para cortar esa demanda.

Por ello, este escenario sólo es plausible si se logra hacer estos avances tecnológicos que reduzcan los costes de extracción. Claramente, sin embargo, éste ha sido un campo en que se han hecho avances significativos en los últimos años, por lo que este escenario no es imposible, en absoluto, aunque sí es relativamente improbable. Como veremos en el siguiente apartado, en cambio, deberán tenerse en cuenta las implicaciones del aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> con respecto a los riesgos de efectos adversos sobre el cambio climático a largo plazo.

Los otros tres escenarios diferentes muestran un aumento moderado (aunque positivo) del consumo de combustible fósil, a excepción del escenario de crecimiento ecológico, donde el consumo de petróleo en realidad disminuye debido a la combinación de rápidas mejoras de eficiencia energética

Gráfico 2.5: Previsiones de crecimiento del consumo de energía primaria global por tipo de combustible en los diferentes escenarios



Fuente: Previsiones del modelo de PwC.

Tabla 2.3: Evolución del mix de combustibles global en los escenarios de base y de crecimiento ecológico

% del total energía primaria	Petróleo	Gas natural	Carbón	Nuclear y renovables	Total energía primaria
Escenario base					
-2005	36,7	23,3	27,7	12,3	100
-2025	35,9	20,6	31,1	12,4	100
-2050	35,5	19,3	33,0	12,3	100
Escenario de crecimiento ecológico					
-2005	36,4	23,5	27,6	12,5	100
-2025	29,3	25,3	29,3	16,1	100
-2050	21,2	23,9	25,1	29,8	100

Fuente: Cálculos de PwC basados en los datos del BP Statistical Review of World Energy (2005).

y de un cambio al gas a corto plazo (aunque esto podría limitarse a un cierto grado por escasez de reservas y precios más elevados del gas) y a la energía nuclear y a renovables a más largo plazo. En términos globales, este último escenario es claramente el más sostenible en términos de conservar los recursos energéticos, aunque requiere un incremento superior al 200% en suministro de energía primaria derivada de energía nuclear y de renovables.

Estos resultados también pueden presentarse en términos de la evolución temporal del mix de combustibles global, según se resume en la tabla 2.3 siguiente para nuestros escenarios de base y de crecimiento ecológico.

En el escenario base, la creciente cuota de carbón prevista, a expensas de otros combustibles fósiles, refleja la creciente importancia de China y la India en el consumo de energía global según se ha comentado anteriormente. El escenario de crecimiento ecológico también muestra un cierto incremento en la cuota de carbón (y también de gas natural a expensas del petróleo) en el período inicial hasta 2025, pero a más largo plazo, todos los combustibles fósiles en principio tendrán una cuota inferior, pues habrá nuevas plantas nucleares y se desarrollarán una serie de fuentes de energías renovables. La posibilidad tecnológica de lograr este tipo de cambio en el mix de combustibles y las

medidas políticas que lo apoyarán, como determinados impuestos al CO<sub>2</sub> y/o el comercio de derechos de emisión se tratan más detenidamente en el capítulo 4.

#### 2.4 Resumen: Previsiones de consumo de energía primaria y de crecimiento económico

La tabla que encontramos a continuación resume el análisis realizado para los diferentes escenarios en términos de crecimiento medio anual previsto con las variables clave consideradas. Debe hacerse hincapié, como se ha dicho en el apartado 1.4 anterior, en que nuestro escenario de base es un

Tabla 2.4: Previsión media anual del aumento del consumo de energía primaria y del crecimiento económico en los diferentes escenarios: 2004-2050 (% pa)

Escenarios	PIB	Energía primaria	Petróleo	Gas natural	Carbón	Otros*
Escenario desfavorable	3,2	2,6	2,5	2,1	3,0	2,6
Escenario base	3,2	1,6	1,5	1,1	2,0	1,6
Mix de combustible más ecológico	3,2	1,6	0,4	1,6	1,4	3,6
Crecimiento limitado	2,6	1,0	1,0	0,6	1,3	1,0
Crecimiento ecológico**	3,2	0,6	-0,6	0,6	0,4	2,5

\*Nuclear y renovables.

\*\*Los resultados son los mismos para el escenario de crecimiento ecológico + CCS.

Fuente: Previsiones del modelo de PwC.



punto de partida para el análisis, no una previsión de lo que consideramos más probable (sobre todo en lo referente a la mix de combustibles). Aunque los supuestos de eficiencia energética de este escenario están en línea con las tendencias históricas desde el principio de los años ochenta, el supuesto de un mix de combustibles constante en todos los países nos lleva a una previsión a nivel global de un incremento de la cuota del carbón en relación con el petróleo y el gas natural. Esto se debe a la alta presencia del carbón (y al bajo uso del gas) en las grandes economías con un crecimiento relativamente rápido (China y la India), pero en la práctica es más probable que dejen el carbón con el tiempo, lo que quizá nos lleve al escenario de mix de combustibles más ecológico (aunque la escala del aumento de la oferta nuclear y de renovables de este escenario quizá sea demasiado ambiciosa dadas las circunstancias). La disminución de las reservas de petróleo y gas (lo cual puede imponer una presión al alza de los precios energéticos) y las preocupaciones medioambientales también pueden ser argumentos plausibles para dar un empuje a las mejoras de eficien-

cia energética, de modo que nos acerquemos al escenario de crecimiento ecológico.

Y es evidente que podrían plantearse otras variantes de estos cinco escenarios. Por ejemplo, una visión menos optimista del potencial de crecimiento económico global —en especial en lo referente al cierre de la brecha con el E7— se podría combinar con una eficiencia energética mejorada y un mix de combustible más ecológica para llevarnos hacia lo que podríamos llamar un escenario de “crecimiento ecológico limitado”, en el que todas las tasas de crecimiento rondarían el 0,6% anual por debajo de las del escenario de crecimiento ecológico anterior. Pero no está claro que crear más escenarios arroje más luz al proyecto, de modo que en la próxima sección seguiremos centrándonos en los seis escenarios descritos en el capítulo 1, si bien iremos un poco más allá en el análisis para ver las implicaciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> y en los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub>.

# 3. Emisiones de CO<sub>2</sub> y niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub> de los diferentes escenarios

## 3.1 Previsión global de emisiones de CO<sub>2</sub> y de niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub>

Mediante los supuestos descritos en el apartado 1.5 anterior, podemos traducir nuestras previsiones de consumo de energía primaria por tipo de combustible en los diferentes escenarios en previsiones alternativas para las emisiones de CO<sub>2</sub> (véase el gráfico 3.1).

En el escenario desfavorable, las emisiones de CO<sub>2</sub> globales se duplicarían aproximadamente en el 2025 desde los niveles actuales (justo por encima de 7 GtC) y en el año 2050 al menos se habrían triplicado. Es probable que esto no sea sostenible teniendo en cuenta las implicaciones para el cambio climático.

Incluso el escenario base —comparable a los escenarios de la situación actual, sin cambios (business as usual) que presentaba el IPCC, la AIE y otros— implica más que duplicar las emisiones de CO<sub>2</sub> globales, hasta alcanzar las 15 GtC en el año 2050.

El incremento previsto podría reducirse a la mitad (lo que correspondería a un c. 25% de reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> globales en 2050, con respecto a nuestro escenario base) bien limitando el aumento global del PIB, para que fuera de 0,6 puntos porcentuales por año o menos, o bien pasando a un mix de combustibles ecológico, con una cuota de nuclear y renovables que debería más que duplicar sus niveles actuales con respecto a la energía primaria total en 2050. En relación con el escenario de crecimiento limitado, sin embargo, esto no sólo implicaría una reducción de c. 25% del PIB global en 2050; en el caso del E7 sería un retroceso del c. 33% de su PIB, lo cual implica una carga desproporcionada para las economías emergentes.

Gráfico 3.1: Previsión de emisiones de CO<sub>2</sub> en los distintos escenarios

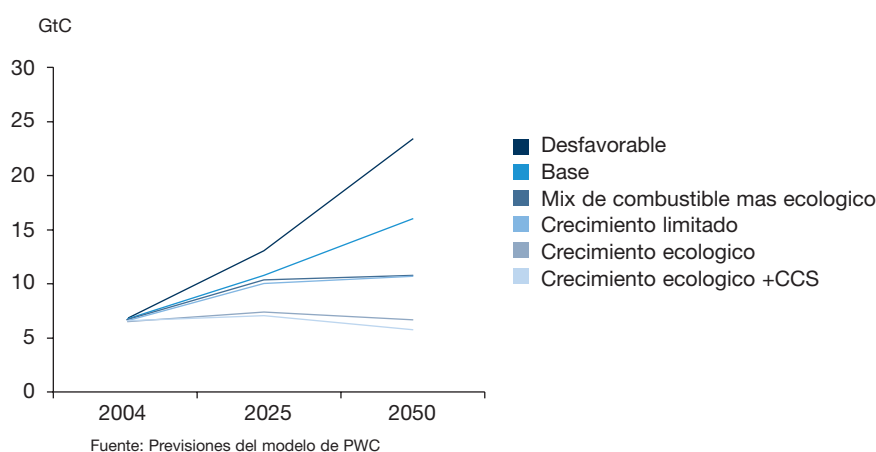
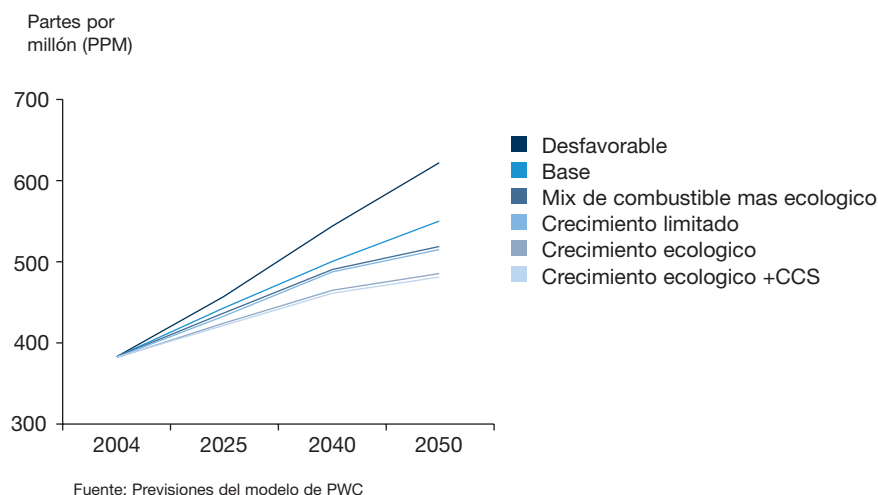


Gráfico 3.2: Previsión de los niveles de concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> en los distintos escenarios



Parece poco probable esperar que estos países con menos recursos limiten su crecimiento para rescatar a los países mucho más ricos del impacto acumulativo en el cambio climático de sus procesos de desarrollo económico del pasado. En cualquier caso, como se trata con más detalle en el capítulo 4, pasar a un mix de combustibles más ecológico gradualmente, con el tiempo, parece que probablemente será un mecanismo más efectivo desde el punto de vista de los costes que limitarse a poner trabas al crecimiento económico, siempre que se pongan en marcha en breve los planes para llevarlo a la práctica. De

hecho, si estos ajustes se retrasan, las crisis medioambientales pueden llevarnos a sacrificios futuros mucho mayores para el crecimiento económico.

El escenario con un mix de combustible más ecológica puede no bastar por sí mismo, porque como se puede ver en el gráfico 3.1, sigue presentando un incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub> globales de más del 60% en 2050. Haciendo las traducciones pertinentes en previsiones de niveles de concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> globales (usando la metodología descrita en el capítulo 1.6 anterior), hemos obtenido los resultados para éste y para los diferentes escenarios, y se muestra en el gráfico 3.2.

Podemos ver que el escenario con un mix de combustible más ecológico (o de hecho, el escenario de crecimiento limitado) implicaría unas concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de más de 500 ppm en 2050, lo que la mayoría de científicos actuales aceptarían como límite máximo para evitar riesgos de efectos severos de cambio climático (y en realidad, muchos ahora apuestan por niveles inferiores, como máximo 450 o incluso 400 ppm). Además, esta tasa de incremento estaría, en el mejor de los casos, en un ligero proceso de desaceleración en este escenario.

Esto sugiere que el escenario de crecimiento ecológico podría ser un objetivo prudente al que aspirar, lo que implicaría una reducción gradual de las emisiones de CO<sub>2</sub> globales desde un máximo que estaría en torno a las 8,5 GtC en 2025 a unas 7,5 GtC en el 2050, ligeramente por encima de los niveles actuales (véase el gráfico 3.1).

Sin embargo, como se ilustra en el gráfico 3.2, esto aún implicaría unos niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de unas 475 ppm en 2050 y seguirían creciendo a unas 2 ppm en ese momento según nuestro modelo, de un modo similar a la tasa estimada de incremento actual. De este modo, este escenario parece que sería el mínimo aceptable en el mejor de los casos e idealmente, debería ser complementado por una combinación de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> para reducir las emisiones a la atmósfera hasta 2050 y por otras medidas para reducir las emisiones a una tasa más rápida más allá de esa fecha.

En relación con la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCS), los gráficos 3.1 y 3.2 incluyen el escenario de crecimiento ecológico + CCS, en el que se asume que gradualmente se llegará a 1,5 GtC en el año 2050,<sup>28</sup> de modo que las emisiones de CO<sub>2</sub> globales derivadas de combustibles fósiles alcanzan su máximo en torno a las 8tC en 2025 y a partir de ahí, retroceden hasta llegar a unas 6 GtC en 2050 (véase el gráfico 3.1). El efecto de la tecnología de CCS en los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub> no parece tan importante en el gráfico 3.2, porque necesita tiempo para materializarse, pero tiene el efecto de reducir de modo significativo la tendencia al alza de los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera en 2050, con la probabilidad de que este nivel alcance su máximo en 2060, en torno a las 465 ppm y entonces se inicie el retroceso, asumiendo que las tendencias de las emisiones de CO<sub>2</sub> en los años 2040 se mantengan después de 2050. Este escenario de crecimiento ecológico + CCS puede tenerse en consideración si se quiere

<sup>28</sup> Este supuesto está dentro de los efectos posibles del CCS considerados en un informe elaborado en 2005 por el IPCC sobre captura y almacenamiento de carbono (véase el apartado 4.1 para más detalles al respecto).

responder a muchos de los recientes estudios científicos que sugieren el objetivo de estabilizar las concentraciones de CO<sub>2</sub> en un límite en torno a las 450 ppm y por supuesto por debajo de las 500 ppm.<sup>29</sup> En contraste, se puede extrapolar a partir de nuestro escenario de crecimiento ecológico sin CCS, y vemos que los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera podrían llegar a 500 ppm en el 2075, sin una estabilización clara.

En resumen, nuestro escenario de base (situación actual, sin cambios: “business as usual”) conlleva unas emisiones de CO<sub>2</sub> que se habrán más que duplicado en 2050 y un acelerado incremento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Para llegar a lo

que, según los datos científicos más recientes, sería un resultado sostenible, parece que sería necesario, como en nuestro escenario de crecimiento ecológico + CCS, combinar el cambio a un mix de combustibles con mucha menos emisión de CO<sub>2</sub>, con mejoras de eficiencia energética significativas más allá de la tendencia histórica, y una importante inversión en captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (véase el gráfico 3.3).

Ahondamos en las opciones políticas y tecnológicas para lograrlo en el capítulo 4, pero antes es preciso analizar con más detalle nuestras previsiones de emisión de CO<sub>2</sub> en este escenario en comparación con nuestro escenario base.

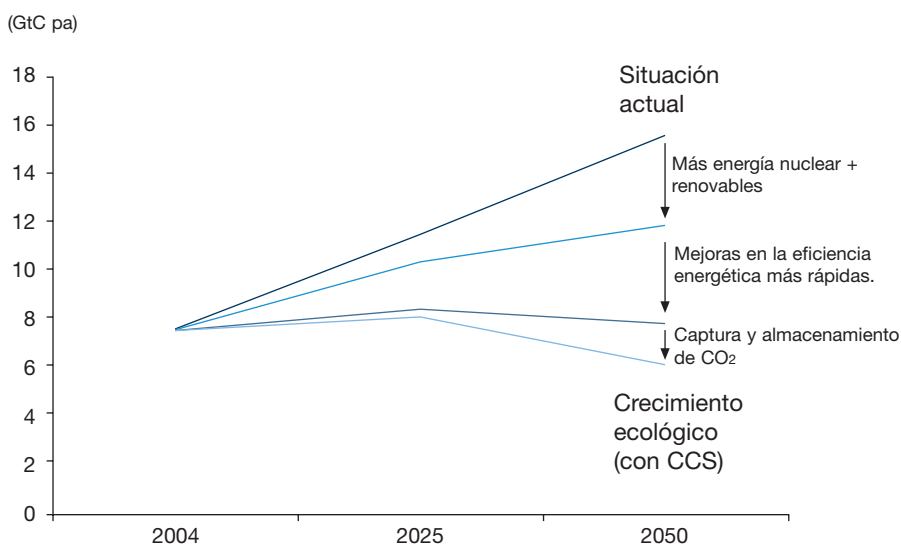
### 3.2 Previsiones de emisiones de CO<sub>2</sub> por país/región

Es interesante considerar cómo varían las emisiones de CO<sub>2</sub> previstas por país y región en los distintos escenarios. El gráfico 3.4 ilustra cómo las emisiones de CO<sub>2</sub> previstas varían según el punto geográfico<sup>30</sup> en nuestro escenario de base y de crecimiento ecológico + CCS (partiendo de la base, en ausencia de datos reales a esas alturas, de que los efectos del CCS se reparten de modo proporcional en todos los países).

Para todo el mundo, el requisito es reducir el crecimiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> acumuladas en el período 2004-2050: pasar del 112% del escenario de base (situación actual, sin cambios o “business as usual”) a -17% del escenario de crecimiento ecológico + CCS, pero hay una marcada diferencia entre las economías del G7, donde son necesarias reducciones de un poco más del 50% de media: desde un 43% en Francia (donde las emisiones de CO<sub>2</sub> se mantienen a la baja en nuestro escenario base por su mayor cuota de energía nuclear con respecto a la energía total) hasta el 57% de Alemania. Para los EE.UU., la reducción necesaria está en torno al 50% y para el RU, en torno al 55%.<sup>31</sup> Para la UE en su conjunto, se ha fijado en el 50% aproximadamente.

En cambio, para el E7, es necesario mitigar el crecimiento de sus emisiones de CO<sub>2</sub> en el período hasta el 2050, desde un 224% en el escenario base hasta un 30% en el escenario de crecimiento ecológico + CCS. En cambio, un análisis más detallado sugiere que las emisiones de CO<sub>2</sub> del E7 pueden alcanzar su máximo alrededor del 2030

Gráfico 3.3: Tres pasos para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> globales a niveles sostenibles en el año 2050



Fuente: Previsiones del modelo de PwC. Estas cuatro líneas corresponden (de arriba a abajo) a nuestros escenarios de base, mix de combustible más ecológico, crecimiento ecológico, y crecimiento ecológico + CCS. “Sostenible” aquí se entiende como ‘coherente con unas concentraciones estables de CO<sub>2</sub> atmosférico global en torno a las 450 ppm en 2050’.

29 Ahora bien, la opinión de los científicos sobre lo que se considera aceptable se ha ido revisando a la baja en los últimos años, conforme se van acumulando las pruebas de la velocidad del calentamiento global y conforme crece la preocupación sobre los efectos que podrían empeorar el impacto de un nivel determinado de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (p. ej.: porque esto lleve a temperaturas más elevadas que reduzcan la capacidad de los océanos y del suelo de absorber CO<sub>2</sub>, por lo que deberíamos afrontar mayores concentraciones de CO<sub>2</sub>, etc.).

30 Para este gráfico y otros de este apartado, hemos estimado las emisiones de CO<sub>2</sub> para toda la UE 25 a partir de la extrapolación de los resultados de las cinco economías mayores de la UE que se incluyen en nuestro modelo.

en el último escenario y a partir de ahí, empezar a retroceder de modo gradual hasta 2050 (y en adelante). Dentro del grupo del E7, el gráfico 3.4 nos muestra la variedad de tasas de aumento previstas, con los siguientes puntos destacados:

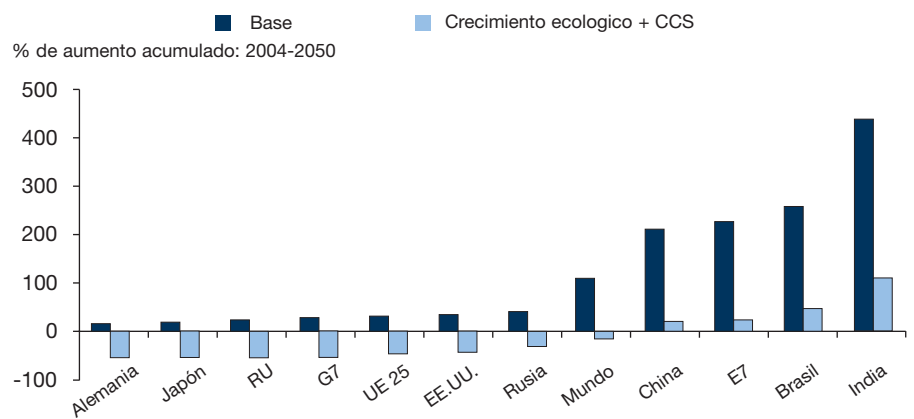
- Un incremento del 24% en las emisiones de CO<sub>2</sub> chinas en el 2050 en el escenario de crecimiento ecológico + CCS (con su máximo en el 2025), a la baja desde el 205% del escenario base.
- Un incremento del 118% de las emisiones en la India en el escenario de crecimiento ecológico + CCS en 2050, con respecto a más del 400% del escenario base, pero sus emisiones alcanzan su máximo en el escenario anterior en el 2045.
- En contraste con las otras economías emergentes, un retroceso previsto de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Rusia en torno al 47% en 2050 en el escenario de crecimiento ecológico + CCS, aunque con un punto de partida elevado en relación con el PIB actual.

Además de fijarnos en las cifras de crecimiento porcentual del gráfico 3.4, también es interesante prestar atención a las modificaciones absolutas previstas en las emisiones de CO<sub>2</sub> (en GtC) entre 2004 y 2050 por país/región, según se resume en el gráfico 3.5 para nuestros escenarios de base y de crecimiento ecológico. Vemos que el E7 es responsable de unas 5,2 GtC (64%) de un total de 8,15 GtC de incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub> globales previstas en nuestro escenario base entre 2004 y 2050. En el escenario de crecimiento ecológico + CCS, el incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub> del E7 es mucho más modesto, en torno al 0,7 GtC para el período, compensado por

una reducción de 1,4 GtC prevista en las emisiones del G7. Esto incluye los efectos previstos del sistema de CCS.

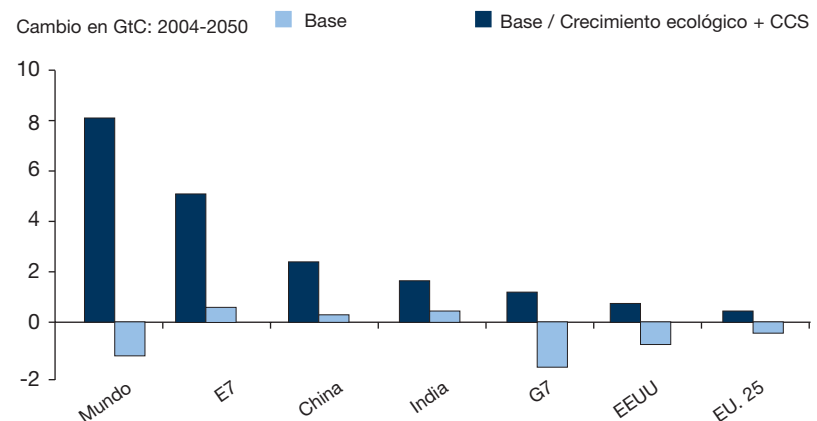
También podemos fijarnos en cómo la cuota de emisiones de CO<sub>2</sub> global varía por economías en estos dos escenarios, según se resume en la tabla 3.1 siguiente. Uno de los puntos que cabe

Gráfico 3.4: Crecimiento previsto de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el escenario de base y en el de crecimiento ecológico + CCS



Fuente: Previsiones del modelo de PwC

Gráfico 3.5: Cambio absoluto previsto en las emisiones de CO<sub>2</sub> en el escenario de base y en el de crecimiento ecológico + CCS



Fuente: Previsiones del modelo de PwC

31 De hecho, el Gobierno del RU aspira a reducciones aún mayores, más del 60%, lo cual puede ser deseable para tener más margen, aunque la base es ligeramente diferente.

Tabla 3.1: Cuota prevista de emisiones de CO<sub>2</sub> globales en los escenarios clave (%)

País o grupo	Cuota en 2004	Escenario base		Escenario de crecimiento ecológico + CCS	
		Cuota 2025	Cuota 2050	Cuota 2025	Cuota 2050
EE.UU.	22,9	16,5	14,5	16,3	13,8
Japón	4,9	3,9	2,7	3,9	2,6
Alemania	3,2	2,3	1,7	2,3	1,6
RU	2,1	1,5	1,2	1,4	1,2
Francia	1,5	1,3	1,1	1,3	1,0
Italia	1,7	1,7	1,0	1,5	1,0
Canadá	2,2	1,7	1,5	1,6	1,2
G7 total	38,6	28,7	23,7	28,3	22,5
China	17,3	24,3	24,8	24,6	25,6
India	4,4	6,7	11,4	6,8	11,7
Brasil	1,2	1,6	2,0	1,5	2,0
Rusia	5,8	4,7	4,0	4,6	3,7
México	1,4	2,1	2,4	2,1	2,5
Indonesia	1,2	2,0	2,9	2,0	2,9
Turquía	0,8	1,3	1,6	1,3	1,5
E7 total	32,1	42,6	49,0	42,8	49,8
Otros*	29,3	28,7	27,0	28,9	27,7
Total mundial	100	100	100	100	100
Memo: UE 25	14,9	12,1	9,2	11,9	8,8
Memo: 3 grandes**	44,6	47,5	50,7	47,7	51,1

\*Sólo se trata de una estimación ilustrativa basada en una extrapolación de las 17 economías del modelo (G7, E7, España, Australia y Corea del Sur).

\*\*EE. UU., China y la India.

Fuente: Previsiones del modelo de PwC.

destacar es que la evolución prevista de las cuotas de emisión de CO<sub>2</sub> global (y en especial, el paso del G7 al E7) no es tan diferente en los dos escenarios mostrados en la tabla 3.1, aunque el nivel absoluto de emisiones se reduzca en torno al 60% en 2050 en el escenario de crecimiento ecológico + CCS en relación con el escenario base. La carga del ajuste queda en parte compensada con el G7 en el escenario de crecimiento ecológico + CCS, pero no de modo muy destacado. En la práctica, sin duda, esto conllevará difíciles negociaciones políticas.

Otro punto destacado es la importancia de las emisiones globales totales de las tres grandes economías (EE.UU., China

y la India). Éstas representan en torno al 45% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> globales y nuestras previsiones sugieren que esto aumentará a justo por encima del 50% en 2050 en cualquier escenario. China superará a los EE.UU. como el principal emisor de CO<sub>2</sub> a partir de 2010 según las previsiones y responderá de casi un cuarto de las emisiones globales totales en el 2025, aunque entonces tenderá a decrecer, pues el crecimiento económico de China previsiblemente se ralentizará. La India tomará el relevo como el principal motor de las emisiones de CO<sub>2</sub> después de 2025, suponiendo que su economía crezca según las previsiones, lo que, por supuesto, no está asegurado.

### 3.3 Resumen y conclusiones

Nuestro escenario de base implica que las emisiones de CO<sub>2</sub> serían más del doble en 2050. Para llegar a lo que, según los datos científicos más recientes, sería un resultado aceptable en términos de mitigar el riesgo de efectos severos en el cambio climático a largo plazo, sería necesario que las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera alcanzaran su máximo en el 2025 aproximadamente, que estuvieran un 10% por encima de los niveles de 2004, y que luego disminuyeran de modo gradual al 15% por debajo de los niveles de 2004 en 2050, igual que en nuestro escenario de crecimiento ecológico + CCS. Esto podría lograrse mediante una

combinación de los tres elementos siguientes:

1. Un cambio a un mix de combustibles con mucho menos CO<sub>2</sub>, con más energía nuclear y más renovables (duplicando de largo la cuota de los combustibles no fósiles como energía primaria en 2050), y reduciendo el recurso a los combustibles fósiles. Pensamos que esto disminuiría las emisiones de CO<sub>2</sub> en 2050 en torno a un cuarto en relación con nuestro escenario base.

2. Una reducción de la intensidad energética más rápida que la tendencia histórica (de 2,6% por año en lugar del 1,6% por año, lo cual reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub> en el 2050 en torno a un tercio en relación con nuestro escenario base).

3. Una inversión significativa en tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCS) y capacidad del orden de 1,5 GtC por año en 2050, lo cual reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub> un 20% en relación con nuestro escenario de crecimiento ecológico sin CCS.

Para las economías del G7, esto puede comportar una reducción acumulada de las emisiones de CO<sub>2</sub> de al menos

un 50% en 2050 en relación con los niveles actuales.

En cuanto a las economías del E7 de crecimiento rápido, a excepción, quizá, de Rusia, parece que sí es realista esperar que recorten sus emisiones de CO<sub>2</sub> en los próximos 25 años, aunque en principio podría esperarse que disminuya su ritmo de crecimiento de manera progresiva. A partir más o menos del año 2030, las emisiones de CO<sub>2</sub> del E7 también puede esperarse que empiecen a retroceder, aunque aún serán del orden del 30% más elevadas en el 2050, en comparación con los datos actuales (incluido el impacto de la captura y el almacenamiento de CO<sub>2</sub>). Es probable que se produzcan modificaciones considerables en el E7 en este caso. Las economías de bajos ingresos, como la India, seguramente necesitarán un crecimiento más rápido de las emisiones, pero también se producirán significativas reducciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> desde los niveles actuales, lo que será necesario y factible en Rusia.

Tras destacar las implicaciones relativas a las emisiones de CO<sub>2</sub> en nuestros diferentes escenarios, el próximo capítulo repasa las posibles opciones políticas y tecnológicas para lograr la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.



# 4. Opciones políticas y tecnológicas para controlar las emisiones de CO<sub>2</sub>

Después de establecer la escala del reto, este capítulo analiza algunas de las opciones para lograr resultados con nuestro escenario de crecimiento ecológico + CCS (asumiendo, digamos, que es un objetivo a largo plazo razonable). Evidentemente, se trata de un tema importante, pero no podemos hacer más que resumirlo brevemente, basándonos en una síntesis de las publicaciones más recientes en la materia. Sin embargo, el mensaje general que queremos transmitir es que hay motivos para el optimismo en lo tocante al potencial para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> de modo significativo a largo plazo sin grandes costes económicos, y ello siempre que se empiecen a aplicar con el tiempo suficiente una amplia serie de iniciativas tecnológicas y políticas.

Esta parte del informe sigue la estructura siguiente:

- Apartado 4.1: Revisa las opciones tecnológicas más prometedoras en relación con la reducción de la intensidad energética del PIB, reduciendo el consumo de energía que produce más CO<sub>2</sub> y desarrollando la captura y el almacenamiento de carbono.
- Apartado 4.2: Revisa el alcance de los instrumentos políticos, como son los impuestos a las emisiones de CO<sub>2</sub> y el comercio de los derechos de emisión negociables para incentivar la reducción de las emisiones, y considera las implicaciones políticas de los cambios tecnológicos inducidos.
- Apartado 4.3: Resume las estimaciones del modelo anterior de los probables costes económicos de lograr la escala necesaria de reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Apartado 4.4: Resumen y conclusión.

## 4.1 Opciones tecnológicas para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>

Pacala y Socolow (2004) argumentan que ya poseemos el know-how tecnológico para solucionar el problema de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el medio siglo que tenemos por delante, y se basan en eso para que las emisiones se estabilicen en no más de los niveles actuales, en torno a las 7 GtC, o en concentraciones atmosféricas que no superen las 500 ppm. Más concretamente, argumentan que en un escenario como el actual, las emisiones globales se podrían duplicar (llegar hasta unas 14 GtC anuales) en 2054, lo que no queda tan lejos de nuestras previsiones de base (justo por encima de las 15 GtC en 2050). A continuación, aseguran que existen hasta quince opciones posibles para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> aproximadamente 1 GtC por año de cara a 2054 en relación con esos 14 GtC de base. Aunque sólo la mitad de estas reducciones por valor de “1 GtC” fueran factibles (o si cada una de ellas nos ofreciera la mitad de esa reducción en promedio), podría lograrse la estabilización de las emisiones de CO<sub>2</sub> en torno a las 7 GtC. De este modo, nos acercaríamos al resultado de nuestro escenario de crecimiento ecológico.

Las quince potenciales soluciones identificadas por Pacala y Socolow se resumen en la tabla 4.1 siguiente. Hemos aportado nuestros propios comentarios a cada opción en la última columna, basándonos en parte en el comentario del artículo original y en nuestro análisis y nuestra evaluación de las opciones. Cabe destacar que su análisis se centra en las tecnologías que hoy en día se conocen y que no

trata el tema del cambio tecnológico inducido (a través de los efectos del aprendizaje por la práctica), que ha sido objeto de buena parte de los últimos estudios en el contexto del cambio climático. Retomaremos esta cuestión más adelante, en el apartado 4.2.

Los ejemplos dados por Pacala y Socolow sólo pretenden ser una ilustración de las posibilidades presentadas por las tecnologías que ya están razonablemente asentadas desde el punto de vista técnico (aunque aún no son viables desde el punto de vista económico, en muchos casos). No se persigue la exhaustividad. También podrían tenerse en cuenta otras opciones, como puede ser la generación distribuida. Sea como sea, esta lista es un útil punto de partida para el debate y a continuación ahondamos en cada uno de los cuatro grupos presentados en la tabla 4.1 anterior.

### A. Eficiencia y conservación energética

Haciendo un especial hincapié en las mejoras sugeridas de eficiencia energética en edificios y en vehículos, parece probable que una parte significativa de 1 GtC sugerida por Pacala y Socolow ya podría estar en nuestro escenario base, pues conlleva ampliar las mejoras históricas de eficiencia energética de estas áreas. Nuestro escenario base, por ejemplo, asume una reducción de la tendencia de un 1,6% anual en la ratio de consumo de energía primaria con respecto al PIB, en línea con la tendencia media global desde principios de los ochenta. Esto implicaría un declive acumulado en la intensidad energética de aproximadamente un 50% en 2050. De este modo, la duplicación del ahorro

de combustible promedio de 30 mpg a 60 mpg de su opción 1 puede considerarse como algo que se da por hecho en este contexto.

Serían aplicables cualificaciones similares a sus supuestos sobre las mejoras de eficiencia energética para edificios y aparatos domésticos (opción 3), así como para centrales eléctricas (opción 4). Esto no significa que no sean posibles o, de hecho, necesarias, mayores mejoras que las asumidas en nuestro escenario base: podrían ser cambios muy básicos, como no dejar los aparatos de casa en stand-by o como utilizar bombillas de bajo consumo, como subrayaba recientemente un informe de la AIE (2006).

En nuestro escenario de crecimiento ecológico, por ejemplo, la reducción necesaria de intensidad energética está en torno al 70% en el 2050. Un requisito importante para lograr esta escala de mejora será que, conforme las economías emergentes se vayan desarrollando, los diseños de edificios, vehículos, fábricas y otros equipamientos consumidores de energía serán más modernos y más eficientes desde el punto de vista energético. El apoyo a esta transferencia de tecnología puede ser una prioridad política para los gobiernos de la OCDE y una oportunidad importante para el sector empresarial de la zona. Sin embargo, con el rápido crecimiento del sector de la automoción, es posible que China se convierta en líder tecnológico global en esta área (y de hecho, también en otras áreas, como la de coches alimentados por celdas de combustible de hidrógeno).

La opción 2 de la tabla 4.1 —que conlleva la reducción a la mitad de los kiló-

metros medios anuales en 2050 (pero con el número de vehículos multiplicado por cuatro)—<sup>32</sup> plantea distintos temas. Ciertamente, no está nada claro por qué la gente debería usar menos el coche en el futuro, a menos que se cuente con fuertes incentivos para hacerlo y con alternativas de buena calidad. En este caso pueden ser necesarias medidas de pago en el transporte por carretera, en cuyo caso los ingresos deberían reinvertirse (al menos en parte) en transporte público.

También deberían sopesarse temas como el llamado tailpipe trading, para trasladar el coste de las emisiones de CO<sub>2</sub> a los precios de la gasolina. El Institute for Public Policy and Research,<sup>33</sup> uno de los principales think tanks del Reino Unido, recientemente sugería que se incluyera el transporte por carretera en el régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero de la UE, por medio de las gasolineras, que podrían tener que comprar derechos de emisión para cubrir las emisiones de CO<sub>2</sub> de los combustibles fósiles que venden cada año. Esto podría trasladarse a otros países si se adoptaran planes similares al del régimen comunitario.

La valoración detallada de ésta y de otras opciones políticas se escapa a las posibilidades de este informe, pero el principio general de que son necesarios nuevos incentivos para fomentar que el sector del transporte controle el incremento de sus emisiones de CO<sub>2</sub> parece bastante sólido, teniendo en cuenta que se trata de un sector en que el aumento de las emisiones ha sido especialmente rápido en las últimas décadas (p. ej., los últimos datos de la Agencia Europea de Medio Ambiente muestran que las emisiones

<sup>32</sup> La previsión de que el número de vehículos se multiplique por cuatro hecha en el estudio de Pacala y Socolow no deja de ser plausible teniendo en cuenta el 328% que se prevé para el incremento del PIB mundial entre 2004 y 2050 en nuestro escenario base, y la probabilidad de que la cifra de coches en propiedad aumente más rápido que el PIB en las economías emergentes, aunque en las economías avanzadas podría suceder lo contrario, pues se rozan los niveles de saturación en la propiedad de coches. Puede haber espacio para reducir el aumento de la propiedad de coches a través de determinadas medidas fiscales y de inversión en gasto público.

<sup>33</sup> Grayling, Gibbs y Castle (2006).

Tabla 4.1: Opciones potenciales para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en 2054 en 1 GtC

Opciones	Cambios necesarios para reducir las emisiones de CO <sub>2</sub> en 2054 1 GtC	Valoración de PwC sobre la probabilidad de lograr dicho cambio y temas importantes
<b>A. Eficiencia y conservación energética</b>		
1. Vehículos con combustibles más eficientes	Aumentar el ahorro de combustible para 2 MM de coches: pasar de 30 mpg a 60 mpg.	Media: Buena parte de esto puede estar reflejado en el escenario base.
2. Reducir el uso de los vehículos	Reducir los viajes en coche para 2 MM de coches desde 8.000 a 16.000 km anuales.	Media: Difícil, pero el precio de los viajes por carretera, los impuestos al combustible y a las emisiones de CO <sub>2</sub> , el mejor transporte público y el teletrabajo pueden ayudar.
3. Edificios y dispositivos con un mejor uso energético	Requiere un recorte del 25% en el uso energético previsto de los edificios y principales aparatos domésticos.	Elevada/Media: Buena parte de esto puede estar reflejado en el escenario base pero se puede hacer más con mejores diseños y prácticas de ahorro energético
4. Centrales eléctricas con combustible fósil más eficientes	Mejorar la eficiencia prevista de las centrales alimentadas con por carbón y pasar de un 40% previsto (32% hoy en día) a un 60%.	Elevada/Media: Buena parte de esto puede estar ya reflejado en el escenario base, pero se puede mejorar
<b>B. Mix de combustible más ecológico</b>		
5. Cambio de las centrales eléctricas del carbón al gas	Sustituir las centrales de carbón de 1.400 GW por gas (se multiplicarían por cuatro los niveles actuales de centrales de gas).	Media: Los precios más elevados del gas han tenido un impacto en la economía; preocupaciones sobre la garantía de suministro.
6. Energía nuclear	Añadir una capacidad de 700 GW (el doble de los niveles actuales).	Elevada/Media: Los costes han bajado pero algunas dudas en torno a la seguridad, los nucleares, los costes de desmantelamiento, los riesgos de actos terroristas.
7. Energía eólica	Añadir 2 millones de molinos de 1 MW (50 veces la capacidad actual).	Media/Baja: Limitaciones técnicas; preocupaciones medioambientales locales; costes si se hace en el mar.
8. Energía solar (FV)	Añadir 2.000 GW FV (700 veces la capacidad actual).	Baja: El aumento necesario es enorme; viabilidad aún no demostrada.
9. Paso de gasolina a células de combustible	La mitad de los coches funcionan con células de combustible a hidrógeno producidas a partir de fuentes de energía renovable.	Media/Baja: Sólo ahorra emisiones de CO <sub>2</sub> si el hidrógeno se produce con emisión cero o reducida.
10. Cambio a biocombustible	Aumentar la producción de etanol 50 veces para sustituir la gasolina.	Media: Potencial de aumento, pero la escala de incremento parece muy elevada (c. 1/6 de la tierra cultivable de todo el mundo).
<b>C. Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub></b>		
11. Almacenamiento de carbono capturado en centrales eléctricas de energía de carga base	Instalar CCS por 800 GW en las centrales de carbón (o en las plantas de gas de 1.600 GW).	Media: Requiere un aumento muy importante de la capacidad de almacenamiento de dióxido de carbono (igual que con las dos opciones siguientes).
12. Almacenamiento de carbono capturado en plantas de hidrógeno	Instalar CCS en las plantas de hidrógeno multiplicando por 10 su capacidad actual.	Media/Baja: Depende del mayor uso de plantas de hidrógeno: ya se cuenta con la tecnología.
13. Almacenamiento de carbono capturado en plantas de combustible sintético	Introducir CCS en plantas de combustible sintético que produzcan 30.000 barriles al día.	Media: CCS, estándar para las plantas de carbón-a-líquido y se tendrá en cuenta para las de plantas gas-a-líquido.
<b>D. Bosques y suelo agrícola</b>		
14. Reducir la deforestación, plantaciones de árboles	Reducir la deforestación de la selva tropical a cero y doblar la tasa actual de plantaciones de árboles.	Media: Ambicioso, pero se puede lograr con el esfuerzo y el consenso de todo el mundo.
15. Cultivo de conservación	Aplicar estas técnicas a todas las plantaciones.	Media/Baja: Actualmente se aplica sólo al 10%.

Fuente: Pacala y Soclow (2004, tabla 1), valoraciones de PwC en la última columna.

de CO<sub>2</sub> del transporte de la UE-15 se incrementan en un 24% entre 1990 y 2003, mientras que las emisiones totales en la UE-15 descienden en torno al 1% en ese mismo período).

En términos globales, las previsiones de eficiencia energética de nuestro escenario de crecimiento ecológico + CCS parecen difíciles, pero se pueden lograr teniendo en cuenta determinados esfuerzos políticos en una serie de frentes (desde la eficiencia del combustible de los vehículos y el diseño de edificios, a bombillas más eficientes desde el punto de vista energético y cambios relacionados con el comportamiento del consumidor; por ejemplo, el uso de “contadores inteligentes” con que los hogares puedan controlar y ajustar su consumo energético de un modo más sencillo).

Esta conclusión coincide con uno de los últimos informes de la AIE (2006), que concluye que las mejoras de eficiencia energética pueden reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 25-30% en relación con la situación actual, que coincide en grandes líneas con nuestro escenario base.<sup>34</sup> Ciertamente, es probable que las mejoras de eficiencia energética sean la fuente principal de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en los próximos 20 años, aunque otras opciones (que requieran más innovación tecnológica) pueden tener un papel importante en horizontes a más largo plazo, como se discutirá más adelante en este mismo texto.

### **B. Mix de combustible más ecológico**

Del análisis anterior se desprende claramente que las mejoras de eficiencia energética por sí solas, si bien son

importantes, es poco probable que basten para producir resultados aceptables depara las emisiones de CO<sub>2</sub>. Como se sugería en la tabla 4.1, es posible que sea necesaria una combinación de los factores siguientes:

- Paso del carbón al gas natural en las centrales eléctricas (opción 5). Esto reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub> a la mitad para una cantidad determinada de electricidad. Revestiría especial importancia en el caso de China y la India, dada su alta dependencia actual del carbón, pero podría perder fuerza si los precios del gas natural suben más en relación con los precios del carbón. Hay también algunas sombras sobre la garantía de suministro para los países que cada vez más tendrían que recurrir a importaciones de gas natural.
- Paso de los combustibles fósiles a la energía nuclear (opción 6). Esto está volviendo a ser un tema de actualidad en varios países (p. ej., en la cumbre del G8 de julio se concluía que la energía nuclear podía tener un papel importante en el futuro de la seguridad energética global, igual que se afirmaba el informe del Reino Unido “2006 Energy Review”).

La energía nuclear puede no haber sido competitiva desde el punto de vista económico en los noventa, pero parece que ahora ofrece perspectivas de una mejor competitividad de costes, dadas las tasas de descuento reales más bajas (que favorecen a la energía nuclear debido a sus costes de capital directos, relativamente elevados comparados con los costes de las plantas que funcionan con gas), los mayores precios del gas y del petróleo en los últimos años, y la introducción del

<sup>34</sup> Cabe destacar, en cambio, que nuestro modelo se creó de modo completamente independiente y que se completó antes de que se publicase el informe de la AIE.

mercado de precios/impuestos del CO<sub>2</sub>.<sup>35</sup>

En principio, la nuclear parece una de las opciones más probables para lograr esa disminución de 1 GtC de Pacala y Socolow, aunque este tipo de energía sigue quedando limitada en diferentes grados dependiendo del país por las preocupaciones de seguridad (justificables o no) y por temas económicos y políticos en relación con la eliminación de residuos nucleares y más a largo plazo, los costes de desmantelamiento. Por estas razones, la adopción de la energía nuclear probablemente no será uniforme en todos los países, pero entre las economías líderes que ya están involucradas activamente en el Generation IV International Forum (GIF) para desarrollar la siguiente oleada de reactores nucleares encontramos a los EE.UU., China, Rusia, Brasil, Canadá, Francia, Japón, Corea del Sur, Sudáfrica, Suiza y el Reino Unido.

- Paso de los combustibles fósiles a las renovables para la generación de electricidad (opciones 7 y 8). Esto requiere sin duda reducciones en los costes relativos de opciones como la energía eólica o la solar —unas reducciones que acabarán llegando— y también hay que tener en cuenta que opciones como parques eólicos en tierra y nuevas presas para obtención de energía hidroeléctrica pueden aumentar la oposición de los ecologistas. Pero éstas no son razones para rechazar esta opción, aunque sí pueden limitar la magnitud de la contribución de las renovables a las reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Si se ofrecen suficientes incentivos

financieros mediante impuestos/precios del CO<sub>2</sub>, de modo que las renovables se hagan más atractivas desde el punto de vista económico, entonces podremos mostrarnos optimistas sobre su potencial a largo plazo.

Esto se refleja en nuestro escenario de crecimiento ecológico (con o sin CCS), que asume sólo un modesto incremento en la cuota de renovables del consumo de energía primaria global hasta 2025, pero un incremento más rápido después de que las tecnologías renovables se desarrollen y sus costes relativos bajen (véase la tabla 3.3 anterior y también el debate sobre el cambio tecnológico inducido en el apartado 4.2, que sugiere que invertir en renovables ahora, aunque no salga a cuenta económicamente a corto plazo, puede ser rentable a largo plazo debido a los efectos del aprendizaje con la práctica). La AIE (2006) también se muestra razonablemente optimista sobre el potencial a largo plazo de las renovables, esgrimiendo que si se aplican los incentivos políticos adecuados, su capacidad podría haberse multiplicado por cuatro en el 2050.

- Paso de la gasolina a las células de combustible de hidrógeno para los coches (opción 9). Esto sólo será ventajoso si el hidrógeno se produce con emisión cero o baja (p. ej., mediante renovables o, al menos, gas natural, en lugar de carbón). Como apuntaban Pacala y Socolow, sin embargo, las reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del uso de renovables para producir el hidrógeno que serviría para las células de combustible de los coches son más o menos la mitad de las que se obtienen si se produce electricidad a partir de renovables. Por ello,

esta opción tiene algunas desventajas, pues hay limitaciones en la cantidad general de producción de renovables que es factible o viable desde el punto de vista económico.

- Paso al biocombustible (opción 10). Sobre todo en relación con el uso de etanol como sustitutivo de la gasolina. Brasil está aumentando de modo significativo su producción de etanol a partir de la caña de azúcar, y los principales productores de maíz, como los EE.UU., también podrían ampliar su producción en ese sentido. Según Pacala y Socolow, sin embargo, hay límites en la escala de producción de etanol, a raíz de los requisitos de uso de la tierra. Se estima que la producción de etanol debería incrementarse en un factor de aproximadamente 50 en relación con los niveles actuales para producir 1GtC de ahorro de CO<sub>2</sub> a través de la sustitución de la gasolina, lo cual puede requerir 250 millones de hectáreas de nuevas plantaciones, lo que equivale aproximadamente a una sexta parte de la tierra cultivable del mundo, según sus previsiones. Este incremento parece muy complicado, pero hay que decir que el etanol (y otros biocombustibles) podrían hacer una contribución más discreta y aún tendrían un peso significativo en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En términos globales, Pacala y Socolow destacan el potencial de hasta 5 GtC de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en relación con su escenario base con las medidas anteriores, y estas opciones podrían ampliarse (no incluyen, por ejemplo, los posibles efectos de aumentar el uso de la energía hidroeléctrica o mareomotriz).

<sup>35</sup> Para más información sobre la mejora económica de la energía nuclear en relación con los combustibles fósiles, véase World Nuclear Association (2005).

Nuestro propio escenario con una mix de combustibles más ecológico implica una reducción en torno a las 3,5 GtC de emisiones de CO<sub>2</sub> en relación con nuestro escenario base en 2050, aunque esa reducción sería muy inferior si el consumo de energía total ya se ha limitado por mejoras de eficiencia energética. En general, este objetivo se plantea difícil en términos de escala del paso a nuclear y a renovables en particular, lo que requeriría un ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> dentro de lo indicado en el análisis de Pacala y Socolow. Es poco probable que el mercado ofrezca esas modificaciones de modo automático, por lo que seguramente será necesaria la intervención del Gobierno, en forma de alguna especie de imposición sobre el precio del CO<sub>2</sub>, con el posible añadido de incentivos más específicos en apoyo de las tecnologías renovables, y sobre eso ahondamos en el apartado 4.2 siguiente.

### **C. Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCS)**

Pacala y Socolow ven posible llegar a una reducción de hasta 3 GtC en las emisiones de CO<sub>2</sub> a partir de la tecnología de CCS (en relación con su escenario base) y un informe elaborado el año pasado por el IPCC (2005) también preveía un considerable alcance para la reducción de las emisiones de dióxido de carbono a partir de este método. El informe del IPCC prevé que una planta equipada con un sistema de CCS (y con acceso a una apropiada capacidad de almacenamiento oceánico o geológico) podría reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en torno al 80-90%<sup>36</sup> en comparación con una planta sin CCS. Actualmente contamos principalmente con

tres tipos de sistemas de captura de carbono:

- Captura de CO<sub>2</sub> por postcombustión desde los gases de los combustibles, que ya se usa en un pequeño número de centrales eléctricas, y se está aplicando una tecnología similar en la industria de procesamiento del gas natural.
- Captura de CO<sub>2</sub> por precombustión, basada en una tecnología que ya se ha aplicado ampliamente en la producción de fertilizantes y de hidrógeno.
- La combustión con oxígeno, que sigue estando en fase de prueba, pero al usar oxígeno de elevada pureza, se obtienen altas concentraciones de CO<sub>2</sub> en el flujo de gas, lo cual facilita la separación con respecto a la combustión convencional.

Para las centrales eléctricas, en general, resultará considerablemente más caro y menos eficiente introducir la captura de carbono en las plantas existentes que diseñar nuevas plantas con sistemas de CCS integrados. Teniendo en cuenta el rápido programa de nuevas centrales eléctricas en desarrollo en las economías emergentes como China y la India, introducir el CCS en los diseños de las nuevas plantas es una cuestión prioritaria. Los costes extras que esto implica pueden compensarse en parte si el CO<sub>2</sub> se puede inyectar en bolsas de petróleo y gas para mejorar las tasas de extracción.

Queremos destacar que el CCS ya se está convirtiendo en una opción de base en las plantas de carbón a líquido planificadas por las empresas energéticas punteras, y también se está planteando en plantas de gas a líquido. El almacenamiento de CO<sub>2</sub> en forma-

36 Las tecnologías disponibles actualmente pueden captar en torno al 85-95% del CO<sub>2</sub>, pero esto queda en parte compensado por el hecho de que una planta con CCS requiere un 10-40% más de energía que una planta sin CCS.



ciones geológicas en tierra o en mar usa muchas de las tecnologías bien establecidas en el sector del petróleo y el gas, y ya se ha demostrado que es factible económicamente en determinadas circunstancias. Se trata de inyectar CO<sub>2</sub> en formaciones salinas adecuadas o en bolsas de petróleo o gas a una profundidad de 800 m como mínimo.

En el momento en que se publicaba el informe del año pasado del IPCC ya existían tres casos en que se estaba trabajando con sumideros de este tipo: el proyecto Sleipner, en una formación salina en el mar en Noruega; el proyecto Weyburn EOR, en Canadá, y el proyecto In Salah, en una bolsa de gas de Argelia. Están previstos más proyectos de este tipo, aunque cabe decir que Pacala y Socolow estiman que serían necesarios unos 3.500 espacios de almacenamiento de la escala del proyecto Sleipner para dar cabida al CO<sub>2</sub> que habría que capturar hasta 2050 en cualquiera de sus opciones 11-13 de la tabla 4.1 anterior. Está por ver si es posible lograr ese enorme incremento de la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

El informe del IPCC incluye análisis de modelos que sugieren que los sistemas de CCS podrían ser factibles desde el punto de vista económico para las centrales eléctricas si los precios del CO<sub>2</sub> (o los impuestos) rondan los 25-30 USD/t CO<sub>2</sub> (lo cual está en la línea de los precios de los derechos de emisión del marco comunitario). El informe también prevé que la capacidad de almacenamiento de todo el mundo técnicamente podría estar en torno a las 2.000 Gt CO<sub>2</sub>, equivalentes a unas 545 GtC, mientras que lo que se estima económicamente factible son unas 60-600GtC acumula-

das para el período hasta 2100, dependiendo del modelo y el escenario utilizado. El escenario de crecimiento ecológico + CCS que presentábamos en el capítulo 3, con unos efectos anuales que lograban hasta 1,5 GtC entre 2010 y 2050, y que a partir de ahí, se estabilizaban, podría implicar un requisito de capacidad acumulada en torno a las 75 GtC, lo cual no es para nada imposible según el análisis del IPCC.

En la práctica, como se afirma desde el propio IPCC, hasta donde es factible económica y tecnológicamente, es probable que haya factores que retrasen la implementación del CCS en términos del impacto medioambiental, riesgos de escapes, preocupaciones de las partes implicadas sobre las responsabilidades intergeneracionales (porque se está aplazando la solución para las generaciones futuras), regímenes fiscales y falta de un marco legal claro o aceptación pública en este estadio. Pero el informe del IPCC concluye que la tecnología de CCS debería poder tener un buen papel en la mitigación de la acumulación de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el siglo que viene, con quizá un 15-50% de la mitigación total en este período en los distintos escenarios. Nuestro escenario de crecimiento ecológico + CCS hace su contribución en aproximadamente un 20% de la reducción total de las emisiones de CO<sub>2</sub> en relación con nuestro escenario base, de modo que está en el extremo inferior del abanico ofrecido por el IPCC.

#### **D. Medidas para potenciar los sumideros naturales de CO<sub>2</sub>: bosques y suelo agrícola**

En el presente informe hemos querido centrarnos en las emisiones de CO<sub>2</sub>

derivadas del uso energético, pero obviamente es importante combinar los esfuerzos de mitigación en este área (y otros procesos industriales, sobre todo en la producción de cemento) con medidas que potencien los sumideros naturales de CO<sub>2</sub>. Se escapa del alcance de este informe cubrir todas estas opciones de manera pormenorizada, pero Pacala y Socolow muestran lo significativas que son las reducciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> netas a través de medidas como:

- Reducir la tala de árboles de la selva primaria tropical a niveles cero en el 2050 (esto proporcionaría 0,5 GtC anuales en ese año).
- Reforestar en torno a 250 millones de hectáreas en el trópico, con lo cual se añadiría una sexta parte a las actuales áreas de selva tropical del mundo (también proporcionaría 0,5 GtC anuales en ese año).
- Adoptar técnicas de cultivo de conservación para reducir la erosión del suelo, y por lo tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a ese suelo (valoradas en 0,5-1 GtC si se aplicara en todo el mundo, aunque esto parece bastante optimista).

Teniendo en cuenta determinadas incertidumbres, como la importancia de la acción en estas áreas, no hemos tenido en cuenta este potencial en nuestro modelo de concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>. Esto parece lo prudente, dados los recientes avances científicos que sugieren que otros factores (sobre todo los mecanismos que hacen que el calentamiento global reduzca los sumideros naturales de CO<sub>2</sub> automáticamente, por su impacto en los océanos, bosques y suelos) podrían incidir en el empeoramiento del



impacto de calentamiento global a largo plazo a partir de un determinado nivel de emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### 4.2 Cuestiones políticas

Muchas de las opciones políticas relevantes ya se han ido mencionando en este informe, pero vale la pena detenerse en algunas cuestiones (aunque, de nuevo, queda fuera del alcance de este documento tratarlas en detalle). El debate se centra en tres temas:

- a) Impuestos a las emisiones de CO<sub>2</sub>
- b) Comercio de emisiones de CO<sub>2</sub>
- c) Implicaciones políticas del cambio tecnológico inducido

##### a) Impuestos a las emisiones de CO<sub>2</sub>

Un enfoque habitual de los economistas ante el problema de la contaminación medioambiental es, siguiendo a Pigou, la imposición de un impuesto a la fuente de contaminación a un nivel que refleje el coste para la sociedad de los efectos negativos (externalidades) asociados con la actividad contaminante. En la práctica, sin embargo, estimar los costes para la sociedad ligados a las emisiones de CO<sub>2</sub> resulta muy complicado por lo siguiente:

- Si bien contamos con un consenso científico casi universal sobre el hecho de que las emisiones de CO<sub>2</sub> están relacionadas con el calentamiento global, hay significativas vacilaciones sobre la cuantificación precisa de la escala y la agenda temporal de estos efectos.
- Los efectos económicos y sociales del calentamiento global también son objeto de considerables incertidumbres y variarán mucho según los países y regiones (en algunas áreas, por

ejemplo, unas temperaturas ligeramente más altas se verán como algo positivo), de manera que no hay una relación con las emisiones de esas áreas.

- Aunque esos efectos pudieran valorarse, expresarlos en términos financieros con vistas a traducirlo en un impuesto por unidad de CO<sub>2</sub> emitida no es fácil.

Además, como el cambio climático es un fenómeno global, en principio requiere una decisión global sobre el nivel de impuesto por unidad de emisión de CO<sub>2</sub>, pero esto plantea problemas evidentes de coordinación en política internacional, así como de justicia y equidad en términos de cómo debe compartirse la carga entre países ricos y pobres.<sup>37</sup> Si los países fijan sus impuestos por separado, surgirá la preocupación del efecto que pueda tener en su competitividad, y ello podría llevar a presiones políticas importantes para mantener los niveles impositivos de las emisiones bajos o permitir exenciones o tasas más bajas para sectores con un alto uso del CO<sub>2</sub> expuestos a la competencia internacional. Estas presiones políticas podrían ser más difíciles de resistir para los gobiernos nacionales en ausencia de un fuerte consenso internacional sobre la necesidad de gravar las emisiones.

En la práctica, la solución al problema de la coordinación en política internacional ha sido, para la mayoría de los principales países industrializados (no es el caso de los EE.UU.),<sup>38</sup> la adhesión a los objetivos del Protocolo de Kioto para reducir las emisiones medidas de gases de efecto invernadero justo por encima del 5% en 2008-2012 en relación con el año de referencia, 1990 (para la UE, el objetivo impuesto es el 8%), con penali-

37 Teniendo eso en mente, y como el CO<sub>2</sub> se queda en la atmósfera unos doscientos años, el impacto sobre el calentamiento global para los 50-100 años siguientes en gran parte reflejará las emisiones pasadas hechas por los países ricos, más que las emisiones futuras de las economías emergentes, como China y la India.

zaciones legales si estos objetivos no se cumplen (dichas penalizaciones consisten en una reducción de las emisiones por encima del 30% para el período después de 2012, en lugar de penalizaciones económicas directas).

Los diferentes países han intentado cumplir sus objetivos de Kioto de distintas maneras, incluyendo los impuestos a las emisiones de CO<sub>2</sub> en el caso de los Países Bajos, Suecia, Noruega, Finlandia y Dinamarca (Suiza también se ha planteado introducir un impuesto para el CO<sub>2</sub>); nuevos impuestos relacionados con la energía, como el impuesto británico al cambio climático, y el régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero de la UE, que se trata con más detalle en el próximo apartado. También hay espacio según el Protocolo de Kioto para que los países cumplan sus propios objetivos mediante proyectos certificados para reducir emisiones o fomentar la absorción del CO<sub>2</sub> (p. ej., mediante reforestación) bien en países en vías de desarrollo mediante mecanismos de desarrollo limpio (MDL) o en otros países industrializados mediante la aplicación conjunta (AC). Sin embargo, las propuestas hechas a nivel de la UE para aplicar un impuesto que grave las emisiones de dióxido de carbono en los noventa no han prosperado, y en Nueva Zelanda, una propuesta reciente en ese sentido ha quedado también desestimada tras las elecciones de 2005.

Y llegados a este punto nos planteamos dos cuestiones:

- ¿Han sido efectivos los impuestos al CO<sub>2</sub> hasta la fecha?
- ¿Qué escala de impuestos al CO<sub>2</sub>

puede ser necesaria para reducir las emisiones a más largo plazo con vistas a lograr los objetivos alternativos para estabilizar los niveles atmosféricos de concentración de CO<sub>2</sub> en unos márgenes aceptables?

En relación con la primera pregunta, Noruega nos ofrece un interesante estudio, porque introdujo un impuesto al CO<sub>2</sub> relativamente elevado<sup>39</sup> ya en 1991. Bruvold y Larsen (2002) elaboraron un análisis detallado de los factores que marcaban tendencias en las emisiones de CO<sub>2</sub> noruegas<sup>40</sup> entre 1990 (el año antes de aplicar el impuesto al CO<sub>2</sub>) y 1999 (el último año con datos disponibles en el momento de su estudio). A continuación, compararon los resultados reales con un caso en que no se había introducido ningún impuesto al CO<sub>2</sub>, basándose en simulaciones mediante un modelo econométrico de equilibrio general desagregado de la economía noruega (MSG-6), diseñado más concretamente para estudios sobre los efectos medioambientales y económicos de la política sobre el clima. Sus principales conclusiones fueron las siguientes:

- El impacto negativo del impuesto sobre el CO<sub>2</sub> en la economía era mínimo, con el nivel del PIB en 1999 sólo un 0,1% por debajo en el estudio con el impuesto en comparación con el estudio sin el impuesto. La reducción del nivel del consumo doméstico atribuible al impuesto era también mínima, sólo un 0,1% en 1999.

Sin embargo...

- El impacto estimado del impuesto al CO<sub>2</sub> en las emisiones de CO<sub>2</sub> de 1999 también era relativamente bajo, con

sólo un 2,3%, en comparación con los efectos totales de aproximadamente un 14%<sup>41</sup> a partir de las reducciones de la intensidad energética y un menor mix de combustibles de carbono entre 1990 y 1999; además, sin incluir los efectos en el sector del petróleo y gas offshore, el efecto en la economía onshore era una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de sólo un 1,5% entre 1990 y 1999 debido al impuesto al CO<sub>2</sub>.

Bruvold y Larsen argumentan que estos efectos relativamente discretos se deben a que muchos de los principales sectores con energía intensiva (p. ej., metalurgia, química industrial, cementeras) estaban exentos del impuesto porque preocupaba el impacto que podía tener en la competitividad internacional de esas empresas. Por ello, el impuesto sobre el CO<sub>2</sub> no creó incentivos para que esos sectores redujeran su intensidad energética ni de emisión de CO<sub>2</sub>, y se hacían más avances a través de la regulación directa de esos sectores. Los autores concluían que un impuesto al CO<sub>2</sub> con una aplicación más amplia e uniforme habría tenido más efecto en las emisiones, aunque eran conscientes de la dificultad de introducirlo de manera unilateral, sin una coordinación internacional, para los sectores más afectados, con vistas a evitar los posibles efectos perniciosos en la competitividad.

Más recientemente, el Nordic Council (2006) ha emitido un informe sobre el impacto del impuesto del CO<sub>2</sub> en los países nórdicos y bálticos. Los resultados varían según los países, pero coinciden en que, en Finlandia, las emisiones de CO<sub>2</sub> pueden haber sido un 7% mayores a finales de los años noventa que sin el impuesto al CO<sub>2</sub>; en

<sup>38</sup> Australia, con su gran industria del carbón, tampoco ha ratificado el Protocolo de Kioto por razones económicas, y ha preferido adoptar una estrategia a nivel nacional (National Greenhouse Strategy). En términos globales, sin embargo, los países responsables de un poco más del 60% de las emisiones de 1990 (incluyendo Rusia y algunas economías en transición de la Europa del Este que no están en la OCDE) han ratificado el Protocolo, de modo que pasó a formar parte del Derecho Internacional en febrero 2005. Algunos estados de los Estados Unidos también se han impuesto objetivos de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (destaca especialmente el 25% en 2020 de California).

cambio en Dinamarca los efectos del plan de ayudas a las emisiones industriales pueden haber hecho que las emisiones de las plantas afectadas se reduzcan en torno a un 20% en 7 años.

En relación con la segunda pregunta planteada, las previsiones disponibles necesariamente son hipotéticas y tienden a variar de modo considerable dependiendo del modelo utilizado. Por ejemplo, en Edenhofer et al. (2006) se comparan resultados a partir de una serie de modelos diferentes, haciendo hincapié en los niveles de precios/impuestos al CO<sub>2</sub> necesarios para lograr la estabilización de los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub> en torno a las 450 ppm:

- Si los modelos no permitían cambios tecnológicos inducidos, la gama de impuestos al CO<sub>2</sub> necesarios en 2050 (con perfiles al alza variables anteriormente) estaba entre 60 USD y 750 USD por tonelada de CO<sub>2</sub> a un tipo constante de 1995 en dólares estadounidenses.
- Si se tenía en cuenta el cambio tecnológico inducido (p. ej., el aprendizaje con la práctica), cuyos efectos se tratan más adelante, la gama de impuestos al CO<sub>2</sub> necesarios estaba entre 50 y 450 USD por tonelada de CO<sub>2</sub> a un tipo constante de 1995 en dólares estadounidenses.

Expresado en dólares estadounidenses de 2005, la gama general se traduce en 60-900 USD por tonelada de carbono, o de modo equivalente, en torno a 15-250 USD por tonelada de CO<sub>2</sub>. La parte más baja de esta gama es similar a los precios del CO<sub>2</sub> del régimen para el comercio de derechos de emisión de

gases de efecto invernadero de la UE pero un poco por debajo de los niveles impositivos de Noruega. La parte superior de la gama está por encima de los niveles actuales de precios/impuestos de CO<sub>2</sub>, aunque debe destacarse que los modelos generalmente asumen que hay un aumento gradual hacia este tipo de precios/impuestos en 2050, en lugar de transiciones más bruscas.

En resumen, los impuestos al CO<sub>2</sub> son atractivos en teoría, pero se enfrentan a una serie de problemas prácticos y políticos significativos que pueden bloquear su introducción o desembocar (como en el caso de Noruega) en exenciones o tasas reducidas que cambian los efectos del impuesto sobre las emisiones. En parte como reflejo de estos temas, las recientes iniciativas han tendido a centrarse más en los mercados de comercio de emisiones, que proporcionan una alternativa para fijar el precio del CO<sub>2</sub>.

## **b) Comercio de emisiones de CO<sub>2</sub>**

En contraste con los impuestos al CO<sub>2</sub>, que intentan fijar un precio para las emisiones directamente, el comercio de emisiones intenta establecer la cantidad total de emisiones y dejar que el mercado fije el precio mediante la oferta y la demanda. Si los derechos de emisión negociables no cubren las emisiones totales realizadas, las entidades con derechos sobrantes pueden venderlos a los que tengan más emisiones de las que les cubren sus derechos, con lo cual se fomenta la reducción de las emisiones del modo más efectivo desde el punto de vista de los costes, al tiempo que se establece un precio de mercado para el CO<sub>2</sub> que puede actuar como señal para los futuros inversores

39 En 1999, el tipo máximo era de 51 USD por tonelada de CO<sub>2</sub>, aplicado a la gasolina, aunque la media fiscal ponderada era sólo de 21 USD por tonelada de CO<sub>2</sub> después de las pertinentes exenciones y reducciones para algunos productos y sectores.

40 También se plantearon las emisiones de metano y óxido nítrico, pero nos centraremos aquí en los resultados para el CO<sub>2</sub>, por coherencia con el resto de nuestro informe.

41 Estos efectos (y algunos otros factores menores) significaban que las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentaban sólo en un 19% en Noruega entre 1990 y 1999, mientras que su PIB crecía en torno al 35%.

potenciales en tecnologías de cero o bajas emisiones de CO<sub>2</sub>.<sup>42</sup>

Este tipo de enfoque está bien establecido en los EE. UU. en relación con el comercio de emisiones de CO<sub>2</sub> con vistas a lograr un 50% de reducción de emisiones en 2010 y de este modo, combatir la lluvia ácida y los problemas medioambientales asociados, pero es relativamente nuevo para el CO<sub>2</sub>. El Reino Unido estableció un pequeño sistema de comercio de emisiones de CO<sub>2</sub> en 2002, pero con diferencia, el más grande y más significativo desarrollo en el área del comercio de las emisiones de CO<sub>2</sub> fue el lanzamiento en enero de 2005 del mercado de comercio de emisiones europeo (UE ETS), que afecta a casi la mitad de todas las emisiones de CO<sub>2</sub> de la UE (sólo es aplicable a los sectores de generación de energía e industria pesada). Por todo ello, en el resto de este apartado, nos centramos en la reciente experiencia de este sistema y en las lecciones para el futuro del marco comunitario y otros marcos similares que puedan crearse en el futuro.

En 2005, el mercado europeo de comercio de emisiones del marco comunitario se estima que tiene un volumen de comercio de casi 322 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> con un valor negociado total de unos 6.600 millones de euros (8.200 millones de dólares). Después del inicio justo por debajo de los 10€/t CO<sub>2</sub>, los precios del CO<sub>2</sub> subieron hasta un máximo de 30€/t CO<sub>2</sub> a mediados de 2005 antes de oscilar entre los 20-30€/t CO<sub>2</sub>. En la primavera de 2006, sin embargo, se hicieron públicos unos datos de comprobación que demostraban que, en total, los derechos de libre asignación

superaban las emisiones reales por un margen considerable, con la excepción del sector eléctrico. Cuando la oferta resultó que superaba la demanda, los precios de los derechos de emisión de CO<sub>2</sub> cayeron en picado a sólo 10-15€/t CO<sub>2</sub>. La conclusión que muchos han extraído (con el beneficio de la esperanza retrospectiva) es que el mercado y la verificación han funcionado bien, pero que las asignaciones iniciales quizá se han puesto en niveles muy elevados.

Mirando hacia la siguiente fase del mercado europeo de comercio de emisiones (UE ETS), que cubre el período crítico 2008-2012 para lograr los objetivos de Kioto, una lección obvia es que la cantidad de derechos de libre asignación debe fijarse en algún punto por debajo de los niveles probables de emisión,<sup>43</sup> aunque esto podría ir acompañado de la concesión de algunos derechos adicionales (con los ingresos reciclados en medidas de apoyo a las reducciones de emisión de CO<sub>2</sub>).

El Carbon Trust (2006) también ha sugerido que las asignaciones de derechos pueden basarse en cierto grado en los “benchmarks” o tecnologías “best practice”. Para las centrales eléctricas existentes habría que diferenciar entre tipo de planta (p. ej., más para carbón que para plantas de gas) para evitar destruir el valor de los activos existentes, pero para las nuevas plantas podría fijarse una base de unidad de capacidad para fomentar un mayor desarrollo de las opciones con menos carbono (incluyendo el CCS).

Otros cambios deseables a largo plazo podrían ser ampliar el alcance del mercado de comercio de emisiones

europeo para cubrir otros sectores (en especial el transporte) y otros gases de efecto invernadero, y para relacionarlo con otros mercados de comercio de derechos de emisión que han ido surgiendo o que se han desarrollado en otras regiones del mundo. Los planes híbridos —con impuestos al CO<sub>2</sub> y mercado de comercio de emisiones, como los defendidos por McKibbin y Wilcoxon (1997)— también podrían plantearse a más largo plazo.

### **c) Implicaciones políticas del cambio tecnológico inducido**

Como ya se ha mencionado, la introducción de cambios tecnológicos inducidos (o endógenos) ha sido uno de los desarrollos recientes más importantes de los modelos económicos y el análisis del cambio climático relacionado. Esto está relacionado con la literatura de crecimiento endógeno y se refiere a los efectos de aprendizaje con la práctica y/o la inversión en I+D/conocimiento para dejar que las medidas políticas en materia de clima influyan en la dirección y el ritmo del desarrollo tecnológico del modelo, en vez de limitarse a supuestos de datos (exógenos) fijos, como de hecho es el caso en nuestro modelo relativamente simple en lo referente al sector energético.

Grubb, Kohler y Anderson (2002) ofrecen un estudio de la evidencia sobre esto e identifican una serie de implicaciones políticas en relación con los modelos tradicionales en el caso en que el cambio tecnológico sea exógeno, como se resume en la tabla 4.2 siguiente.

Las previsiones de costes se tratan en el siguiente apartado, pero a modo de

42 Nordhaus (2005) esgrime que los planes de negociación de derechos de emisión como el régimen comunitario probablemente son menos eficientes desde el punto de vista económico que los impuestos directos a las emisiones y, a menos que los derechos salgan al mercado de intercambio, no permitirán el potencial “doble dividendo” por el que las ganancias obtenidas se usan para reducir los impuestos sobre el empleo. También asegura que dar a los gobiernos el monopolio del poder para conceder derechos de emisión gratuitos puede comportar cobros indeseables por parte de funcionarios públicos, sobre todo si esos planes llegan a los países en vías de desarrollo. Sin embargo, la alternativa que recomienda Nordhaus, un impuesto al CO<sub>2</sub> armonizado a nivel global, parece poco probable que sea viable desde el punto de vista político en el futuro, aunque resulte atractivo en teoría.

conclusión general de estos resultados a partir del nuevo modelo se puede decir que hay buenas razones para empezar cuanto antes a aplicar un conjunto de distintas políticas. Se pueden incluir el comercio de derechos de emisión/impuestos al carbono, pero también una serie de políticas para estimular la innovación en las tecnologías que producen bajos niveles de emisiones.

La I+D promovida por el Gobierno tiene su función en relación con la investigación científica básica, pero hay una necesidad más general de que las políticas apoyen la inversión en una serie de nuevas tecnologías. Esto puede ser de especial importancia en el sector del transporte, donde (con la excepción parcial de los biocombustibles) aún no hay una tecnología probada que emita bajos niveles de CO<sub>2</sub> y que pueda sustituir a la gasolina y al diésel, lo cual contrasta con el sector energético, en el que ya contamos con una serie de

tecnologías disponibles, si bien aún no son viables desde el punto de vista económico.

El papel de las administraciones en este sentido será facilitar este proceso a través de las medidas reguladoras y fiscales adecuadas, posiblemente incluyendo ayudas por un tiempo limitado a determinadas industrias incipientes, pero en última instancia esto debe ser un proceso dirigido por el sector privado. Al respecto, puede ser de utilidad que, con los efectos del aprendizaje por la práctica, puede haber mayores ganancias comerciales para los que se posicionen primero y logren hacerse con reducciones de costes acumuladas; los que entren más tarde en el mercado quizá no podrán replicarlo.

Otra característica importante del cambio tecnológico inducido que se destaca en la tabla 4.2 está relacionada con los efectos de contagio. Los

modelos tradicionales con cambio tecnológico exógeno tienden a descubrir que si las economías industrializadas tienen incentivos para recortar sus emisiones a través de un impuesto a las emisiones o un sistema cap-and-trade, es probable que esto nos lleve a una migración de los sectores contaminantes a las economías en desarrollo, donde estos costes/limitaciones no serán aplicables. Como se argumenta en Grubb (2000) y Grubb et al. (2002), sin embargo, esto pasa por alto el efecto de contagio positivo que es posible que se produzca cuando la transferencia de tecnologías de los países ricos a los pobres se incorpore en los modelos. Una razón para ello es que, según va avanzando el cambio climático en la agenda, las empresas de las economías industrializadas cada vez tendrán más presión de sus clientes y, seguramente, de sus gobiernos para implementar políticas favorables al clima en todo el mundo, no sólo en sus países de origen.

Tabla 4.2: Implicaciones políticas del cambio tecnológico inducido

Implicaciones	Cambio técnico exógeno	Cambio tecnológico inducido
Coste económico de la estabilización atmosférica de CO <sub>2</sub>	Potencialmente significativo	Bajo o incluso cero/negativo a largo plazo
Instrumentos políticos preferibles	Impuesto pigouviano uniforme más I+D estatal	Amplio conjunto de políticas, incluyendo un refuerzo del estímulo de la innovación privada
Agenda temporal de la acción política	Posponer la reducción de emisiones hasta que los costes de las tecnologías de bajas emisiones de CO <sub>2</sub> hayan caído	Acelerar la reducción de emisiones para inducir a la reducción de costes en tecnologías de baja emisión
Economía de "primeros en actuar"	Costes directos con pocos beneficios: las ganancias para los que imitan las reducciones de costes	Beneficios potenciales importantes debido a que los efectos de aprendizaje con la práctica pueden superar los costes directos
Efecto de contagio de los países con más recursos a los países con menos recursos	Generalmente negativo (los ricos exportan derechos de emisión a los pobres mediante los marcos de comercio, etc.)	Contagio positivo mediante la transferencia de tecnología, lo cual podría superar a los efectos negativos

Fuente: Basado en la tabla E1 de Grubb, Kohler y Anderson (2002).

43 Las primeras indicaciones, sin embargo, nos dicen que algunos gobiernos de la UE pueden mostrarse reticentes a hacerlo, sobre todo Alemania (aunque el Gobierno del RU ha propuesto algunas reducciones).

Otra razón es que las economías emergentes como China y la India cada vez son más conscientes de sus propios problemas medioambientales y por lo tanto querrán desarrollar tecnologías de baja emisión de dióxido de carbono por ellas mismas, y también impondrán normas medioambientales más estrictas a los inversores extranjeros. Grubb et al. (2002) destacan, por ejemplo, que la India es ahora el segundo mayor mercado del mundo en energía renovable después de la UE y que es probable que China vaya ganando cada vez más importancia en este mercado con el tiempo. Esto creará muchas oportunidades para las empresas occidentales que hayan desarrollado estas tecnologías con bajas emisiones inicialmente para sus países de origen (p. ej., la energía eólica en Dinamarca): tendrán oportunidad de exportarlas a todo el mundo.

### 4.3 Costes económicos estimados de la estabilización del CO<sub>2</sub> en la atmósfera

En Anderson y Leach (2005) se nos proporciona un estudio reciente que repasa los muchos trabajos hechos sobre los costes de mitigar el cambio climático. Aseguran que los costes netos de una transición por fases a una economía con bajas emisiones de CO<sub>2</sub> es probable que sean relativamente bajos, y la mayoría de las estimaciones se mueven en el rango de -1% a 4,5% del PIB mundial para los próximos 50 años, con un valor principal en torno al 2,5% del PIB, equivalente a un año de crecimiento tendencial. Esto se puede ilustrar con los resultados de las revisiones ante-

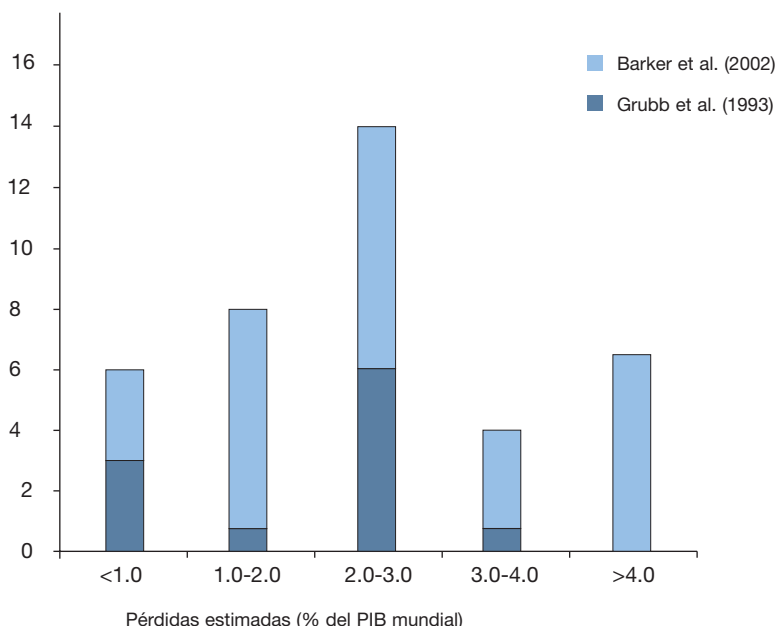
riorios de Barker et al. (2002) y Grubb et al. (1993), según se resumen en el gráfico 4.1 siguiente.

Anderson y Leach explican estos resultados con referencia al hecho de que el sector energético representa aproximadamente un 4% del PIB global, de modo que aunque los costes energéticos se dupliquen como resultado del paso a tecnologías con más bajo consumo de carbono, esto sólo reduciría el PIB mundial en un 4%. En la práctica, esto podría mitigarse mediante un proceso de transición gradual que permita que los efectos del aprendizaje con la práctica a partir del cambio tecnológico inducido tuvieran efecto.

Las implicaciones positivas en general del cambio tecnológico inducido quedaron confirmadas por los resultados de los más recientes modelos, que se resumen en Grubb et al. (2006) y Edenhofer et al. (2006),<sup>44</sup> que en su mayoría demostraban que con los cambios técnicos inducidos, resultaba mucho menos costoso lograr la estabilización de los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Para un objetivo de estabilización de 450 ppm, ocho de cada diez modelos revisaban los costes en 2050 en un 1% del PIB mundial o menos, con dos casos que mostraban costes negativos. Dos de los modelos presentaban unos costes significativamente más elevados; uno presentaba costes en torno al 3% del PIB y otro del 10% del PIB, pero

Gráfico 4.1: Porcentaje estimado de pérdidas del PIB global para una reducción del 50-70% a largo plazo de las emisiones de CO<sub>2</sub> globales

Número de estudios que estiman las pérdidas en la gama mostrada



Fuente: Anderson y Leach (2005)

<sup>44</sup> Estos dos documentos resumen los resultados de una serie de otros trabajos realizados por expertos en modelos económicos que se publicó en un número especial de The Energy Journal sobre el cambio tecnológico endógeno y la economía de la estabilización atmosférica (primavera de 2006).



este último modelo en particular no permitía la sustitución dinámica de las tecnologías con un alto uso de carbono por las de menor uso, y los costes de las opciones de bajo carbono disminuían con el tiempo debido a los efectos del aprendizaje con la práctica, igual que en los otros modelos.

La conclusión preliminar parece ser que, con el cambio tecnológico inducido y la posibilidad de sustituir las tecnologías de alto consumo de carbono por el bajo consumo, los costes de lograr el objetivo de las 450 ppm no tienen por qué ser prohibitivos. Efectivamente, dos de los modelos permiten unos índices tan altos de aprendizaje con la práctica que los costes de la estabilización del CO<sub>2</sub> en realidad se vuelven negativos, porque asumen que hay más alcance para que los costes se reduzcan más en estas nuevas tecnologías que en las actuales con un uso intensivo del carbono, aunque esto sigue abierto al debate.<sup>45</sup>

#### 4.4 Resumen y conclusiones

El análisis anterior sugiere que hay razones para albergar un prudente optimismo en cuanto al logro de las reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> previstas en el escenario de crecimiento ecológico + CCS sin tener que asumir unos costes económicos prohibitivos. Las principales razones para ello son las siguientes:

- Como afirman Pacala y Socolow, existen tecnologías que pueden ofrecer unas reducciones significativas de las emisiones de CO<sub>2</sub>, aunque la mayoría de éstas aún tienen que desarrollarse para ser viables desde el punto de vista económico.

- Hay posibilidades de ampliación de los sistemas de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, según exponía el IPPC en su informe de 2005 en la materia.
- Se ha avanzado en el establecimiento precios del CO<sub>2</sub> a nivel internacional gracias al régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero de la UE, si bien son necesarias reducciones en el número de exenciones hechas (y más salidas al mercado de derechos de emisión) si queremos que proporcione incentivos reales para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Hay un gran número de estudios que demuestran que el coste de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> globales en torno a un 50-70% no debería exceder el 4-5% del PIB mundial, y se prevé una media del 2-3% del PIB mundial, lo que equivale aproximadamente a un año de crecimiento según la tendencia actual.
- Existen efectos potenciales de aprendizaje por la práctica: como ha quedado demostrado por los modelos desarrollados recientemente con cambios tecnológicos inducidos, se pueden reducir aún más estas previsiones de costes, quizá en torno al 1% del PIB mundial o menos en 2050.

Al mismo tiempo, el análisis sugiere que no hay lugar para la complacencia porque:

- Probablemente será necesario aplicar buena parte de las mejoras de eficiencia energética indicadas en el análisis de Pacala y Socolow sólo para lograr el resultado asumido en nuestro escenario base, a pesar de que las emisiones de CO<sub>2</sub> se duplican de largo en 2050 en este escenario. Las mejoras más allá del escenario base pueden ser más difíciles y costosas.

<sup>45</sup> Uno de los modelos que muestran costes negativos a largo plazo (el modelo E3ME) también se basa en los efectos del multiplicador de la demanda keynesiano a partir de una mayor inversión en nuevas tecnologías bajas en carbono en una economía mundial en que se asume que hay capacidad para absorber esta demanda de inversión adicional.



- Esto hace que sea más importante la necesidad de pasar a las alternativas de cero emisiones de CO<sub>2</sub> o a unas con tasas más bajas, pero surgen en ese caso una serie de obstáculos políticos y económicos que serán difíciles de superar, tanto para la Administración como para las empresas del sector energético. La oposición del movimiento ecologista a la energía nuclear es un buen ejemplo de ello, igual que la oposición de la población local a los grandes proyectos hidroeléctricos y a los parques eólicos terrestres.
- A pesar de sus atractivos teóricos, los impuestos a las emisiones de CO<sub>2</sub> han topado con dificultades políticas y prácticas que a menudo han bloqueado su introducción o han comportado exenciones que debilitan de modo significativo los efectos en las emisiones de CO<sub>2</sub> (como bien ilustra el caso noruego descrito en este informe).
- Si bien el régimen comunitario de comercio de emisiones ha sido todo un

éxito porque ha creado un mercado, está por ver hasta qué punto los gobiernos estarán preparados para reducir los futuros derechos de libre asignación, dada la posible oposición de intereses comerciales y las cuestiones en torno a los efectos en la competitividad internacional.

- Considerando los largos plazos de entrega y las largas vidas útiles de las principales inversiones de infraestructuras en el sector de la construcción, el transporte y la energía, no hay tiempo que perder a la hora de poner en marcha estrategias que disminuyan las emisiones de CO<sub>2</sub> en estas áreas si las principales reducciones de las emisiones deben hacerse evidentes a más largo plazo.
- Los efectos del aprendizaje por la práctica son potentes en teoría, pero la verdad es que no conllevan soluciones políticas fáciles; en realidad, sugieren que serán necesarias una amplia gama de políticas que favorezcan la innovación, pero resulta difícil evaluar con precisión la efectividad que se puede lograr.

En resumen, nuestro escenario de base implica unos niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> y unos riesgos asociados significativos de cambio climático adverso, con efectos socioeconómicos muy negativos a largo plazo. Al mismo tiempo, parece haber opciones de relativamente bajo coste para controlar las emisiones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y, basándose en el principio de precaución, puede resultar deseable implementarlas (parece ser bastante más “barato” que la simple contención del incremento del PIB).

Quizá sea necesario que las economías más ricas de la OCDE sean pioneras en el desarrollo de nuevas tecnologías y en la reducción de sus emisiones en las dos próximas décadas, ya que no es muy realista esperar que las economías emergentes de crecimiento más rápido (como China y la India) recorten sus niveles de emisión (en vez de controlar su tasa de crecimiento), pues seguramente no lo harán hasta más tarde en su proceso de desarrollo económico.

# Anexo: Descripción técnica del modelo de crecimiento económico a largo plazo

En línea con la principal teoría del crecimiento económico de finales de los años cincuenta,<sup>46</sup> asumimos que el (output) se puede obtener mediante un modelo con una función de producción Cobb-Douglas con rendimientos de escala constantes y con cuotas de factores constantes. Más concretamente, el output (p. ej., el PIB, que aquí lo llamamos Y) se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Y = AK_a L_{1-a}$$

Donde:

A = Factor de productividad total, que está determinado por el progreso tecnológico en el país más avanzado (aquí asumimos que es EE.UU.) más un factor de recuperación (catch-up) por país en relación con la brecha de productividad inicial con respecto a los EE.UU.

a = Cuota de capital con respecto a los ingresos nacionales totales y 1-a es la cuota de trabajo, ambas se asumen constantes en el tiempo para este modelo.

K = Stock de capital físico, que aumenta según la fórmula estándar:

$$K_t = K_{t-1} (1-d) + I_t$$

Donde: d = tasa de depreciación I<sub>t</sub> = inversión bruta en el año t

L = input de trabajo ajustado a la calidad, que se puede dividir en:

$$L = h(s)eN$$

Donde: h(s) es un ajuste de calidad relacionado con la media de años de formación escolar de la población activa; e es la tasa de ocupación defi-

nida como cuota de la población activa; y N es el número de personas en edad de trabajar.

Supuestos clave

Los supuestos de parámetros clave que hacemos en el escenario base son los siguientes:

- Los parámetros a y d se estipulan en 1/3 y un 5% respectivamente, en línea con los valores utilizados en los estudios académicos anteriores.
- La tasa de recuperación de A se asume que converge en un 1,5% anual para todas las economías del E7 a largo plazo, en línea con el típico 1-2% estimado que parecía en los estudios académicos anteriores. A más corto plazo, sin embargo, las velocidades de recuperación son inferiores, en torno al 0,5-1% anual para las economías emergentes que creemos que tienen camino por recorrer antes de lograr los marcos institucionales, económicos y políticos que son ideales para la convergencia de crecimiento. En particular, asumimos una velocidad de recuperación de sólo 0,5% anual hasta 2020 para la India, Brasil e Indonesia y de un 1% anual para México y Turquía. Para China y Rusia se prevé una velocidad de recuperación de un 1,5% anual desde el inicio.
- Las previsiones iniciales de stock de capital (K) para mediados de los ochenta se toman de Levine y King (1994), actualizadas a 2004 con datos de inversión con los ratios del PIB extraídas de las Penn World Tables (v. 6.1) y el FMI. Estos ratios de inversión (I/Y) se proyectan en el futuro asumiendo que las tendencias recientes se mantienen hasta 2010, y que a continuación se someten a una lenta convergencia del 20% aproximadamente a

partir de 2025, con la excepción de China (25%) e Indonesia (22%).

- Las previsiones iniciales de los niveles educativos medios (s) se toman de Barro y Lee (2001) y se proyectan al futuro basándose en una continuación de las tendencias de los últimos 5-20 años (basándonos en el buen juicio para elegir el período de referencia apropiado en cada caso). El cálculo de la función de ajuste calidad-trabajo h(s) sigue el mismo método que Hall y Jones (1998).
- Las previsiones sobre la población activa (N) son la base central de las previsiones de 2004 de las Naciones Unidas para las edades entre 15 y 59 años. Las tasas de ocupación (e) se asumen que son constantes en el tiempo.

Otros supuestos sobre el crecimiento de la productividad laboral de los EE. UU. (un 0,25% más baja) y sobre las tasas de recuperación del E7 (un 0,5% más bajas hasta 2020, aumentando al 1% más bajas a partir de 2030) se han hecho en el escenario de crecimiento limitado según se ha descrito en el capítulo 1 del presente informe.

Previsiones de tipo de cambio

Los tipos de cambio aplicados a la paridad de poder adquisitivo (PPA)<sup>47</sup> se asume que se mantendrán constantes en el tiempo en términos reales, mientras que los tipos de cambio de mercado convergen de modo gradual con el tiempo a estos niveles, muy a largo plazo. Como nos centramos en este informe sólo en los resultados del PIB a tasas de PPA, como el principal motor de la demanda energética, sin embargo, los detalles de cómo se ha modelado el proceso de convergencia de la tasa de cambio de mercado no nos afecta.

46 Este enfoque general fue introducido por Solow (1956, 1957). Se puede obtener un resumen de los trabajos más recientes en Barro (1997). Wilson y Purushothaman (2003) aplicaron un modelo similar en la conocida publicación sobre las BRIC de Goldman Sachs.

47 Las previsiones iniciales del PIB según. No sé si la quieren poner. de todos modos, no veo en la página esto de King-Levine...

# Bibliografía

- AIE (2005), *World Energy Outlook* (París: AIE/OCDE).
- AIE (2006), *Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050* (París: AIE/OCDE).
- Anderson, D., y M. Leach (2005), "The costs of mitigating climate change", *World Economics*, vol. 6, n.º 3, julio-septiembre de 2005: 71-90.
- Banco Mundial (2005), *Indicadores de desarrollo mundial*, 15 de julio de 2005. Los indicadores clave están disponibles en <[www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)>, desde donde también podemos acceder a los conjuntos de datos de King-Levine y Barro-Lee referidos anteriormente.
- Barker, T., J. Koehler y M. Villena (2002), "The costs of greenhouse gas abatement: a meta-analysis of post-SRES mitigation scenarios", *Environmental Economics and Policy Studies*, vol. 5, 2002: 135-166.
- Barro, R.J. (1997), *Determinants of Economic Growth: A Cross-Country Empirical Study* (Cambridge, MA: The MIT Press, 1997).
- Barro, R.J., y J.W. Lee (2001), "International data on educational attainment: updates and implications", *Oxford Economic Papers*, 53: 541-563. El conjunto de datos está disponible en la web del Banco Mundial, que se cita aquí.
- BP (2005), *Statistical Review of World Energy*.
- Bruvoll, A. y B.M. Larsen (2002), "Greenhouse gas emissions in Norway: Do carbon taxes work?", *Statistics Norway, Research Department, Discussion Papers*, n.º 337, diciembre de 2002.
- The Carbon Trust (2006), *Allocation and competitiveness in the EU Emissions Trading Scheme*, junio de 2006.
- Edenhofer, O., K. Lessmann, C. Kemfert, M. Grubb y J. Koehler (2006), "Induced Technical Change: Exploring its Implications for the Economics of Atmospheric Stabilization. Synthesis Report from the Innovation Modelling Comparison Project", *The Energy Journal*, Special Issue on Endogenous Technical Change and the Economics of Atmospheric Stabilization (IAEE, 2006).
- Grayling, T., T. Gibbs y B. Castle (2006), *Tailpipe Trading: How to include road transport in the EU Emissions Trading Scheme*, Institute for Public Policy Research, junio de 2006.
- Grubb, M., J. Edmunds, P. Brink y M. Morrison (1993), "The costs of limiting fossil-fuel emissions: a survey and analysis", *Annual Review of Energy and the Environment*, 20: 71-81.
- Grubb, M. (2000), "Economic dimensions of technological and global responses to the Kyoto Protocol", *Journal of Economic Studies*, 27, n.º 1/2: 111-125.
- Grubb, M., J. Koehler y D. Anderson (2002), "Induced technical change in energy and environmental modelling: Analytical Approaches and Policy Implications", *Annual Review of Energy and the Environment*, 27: 271-308.
- Grubb, M., C. Carraro y J. Schnellhuber (2006), "Technological Change for Atmospheric Stabilization: Introductory Overview to the Innovation Modelling Comparison Project", *The Energy Journal*, Special Issue on Endogenous Technical Change and the Economics of Atmospheric Stabilization (IAEE, 2006).
- Hall, R.E. y C.I. Jones (1998), "Why Do Some Countries Produce So Much More Output per Worker than Others?", *Stanford University Working Paper*, n.º 98-007, marzo de 1998.
- IPCC (2000), *Special Report on Emissions Scenarios*, Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press).
- IPCC (2001), *Mitigating Climate Change: Summary for Policymakers*, Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- IPCC (2005), *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage: Summary for Policymakers*, Cambridge University Press.
- King, R. y R. Levine (1994), "Capital Fundamentalism, Economic Development and Economic Growth", *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*, 41 (otoño de 1994): 157-219. El conjunto de datos está disponible en la web del Banco Mundial, que se cita aquí.
- McKibbin, W. y P. Wilcoxon (1997), "A Better Way to Slow Climate Change", *Brookings Policy Brief 17* (Washington DC: Brookings Institution, junio de 1997).
- Miles, D. y A. Scott (2004), *Macroeconomics and the global business environment* (Londres: John Wiley & Sons).
- Naciones Unidas (2005), *World Population Prospects: The 2004 Revision*. Se pueden bajar los datos de

<www.un.org>.

Nordhaus, W.D. (2005), "Life after Kyoto: Alternative Approaches to Global

Warming Policies", Yale University, diciembre de 2005 (documento de trabajo disponible en la web del autor: <<http://nordhaus.econ.yale.edu>>).

Nordic Council (2006), The Use of Environmental Instruments in Nordic and Baltic

Countries, 2001-2005 (Copenhagen: Nordic Council of Ministers, junio de 2006).

Pacala, S. y R. Socolow (2004), "Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies", Science, vol. 305, 13 de agosto de 2004.

Retallack, S. (2005), Setting a long-term climate objective: a paper for the International Climate Change Taskforce, Institute for Public Policy Research.

Solow, R. (1956), "A Contribution to the

Theory of Economic Growth", Quarterly Journal of Economics, febrero de 1956.

Solow, R. (1957), "Technical Change and the Aggregate Production Function",

Review of Economics and Statistics, agosto de 1957.

Stern, N. (2006), "The Economics of Climate Change", Keynote Speech to the Oxford

Institute of Economic Policy, 31 de enero de 2006 (disponible en:

<[http://www.hmtreasury.gov.uk/independent\\_reviews/stern\\_review\\_economics\\_climate](http://www.hmtreasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.cfm)

[change/sternreview\\_index.cfm](http://www.hmtreasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.cfm)>).

Wilson, D. y R. Purushothaman (2003), "Dreaming with BRICs: The Path to 2050", Goldman Sachs, Global Economics Paper, n.º 99, octubre de 2003.

World Nuclear Association (2006), The New Economics of Nuclear Power,

diciembre de 2005 (disponible en <[www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org)>).

## Acerca de PricewaterhouseCoopers

PricewaterhouseCoopers ([www.pwc.com](http://www.pwc.com)) ofrece a las empresas y a la Administración servicios profesionales especializados en cada sector. Más de 146.000 personas en 150 países aúnan sus conocimientos, experiencia y soluciones para dar confianza e incrementar el valor de sus clientes y stakeholders. PwC presta servicios de auditoría, asesoramiento legal y fiscal (Landwell), consultoría de negocio, corporate finance y consultoría de recursos humanos con una fuerte especialización sectorial

## Sobre el autor

John Hawksworth es responsable de Macroeconomía en la firma del Reino Unido de PricewaterhouseCoopers y dirige nuestra publicación Economic Outlook. Es autor de numerosos informes y artículos sobre macroeconomía y sobre diferentes temas de políticas públicas, y colabora con diferentes medios de comunicación del RU como experto en estos temas. Ha realizado trabajos de consultoría para un amplio abanico de firmas del sector privado y para instituciones públicas, tanto del RU como del extranjero, y ello durante 20 años.

Agradecemos los útiles comentarios de Richard Gledhill, Ian Milborrow, Tim Ogier, Geoff Lane, Mark Hughes y Ronan O'Regan.

El presente informe se apoya en la vasta experiencia de PricewaterhouseCoopers en el sector de la energía y los servicios públicos, medio ambiente y sostenibilidad, cambio climático y temas relacionados del ámbito fiscal y regulador.

## Contactos

Si desea obtener más información sobre este informe o sobre cualquier tema relacionado, puede contactar con las siguientes personas

Francisco Martínez  
Paseo de la Castellana, 43  
28046 Madrid  
Tel.: 91 568 47 04  
[francisco.martinez@es.pwc.com](mailto:francisco.martinez@es.pwc.com)

Mariola Pina  
Paseo de la Castellana, 43  
28046 Madrid  
Tel.: 91 568 41 45  
[mariola.pina@es.pwc.com](mailto:mariola.pina@es.pwc.com)

Para más información sobre nuestra experiencia general en este campo, pueden ponerse en contacto con las siguientes personas:

Tim Ogier	Economía	<a href="mailto:tim.ogier@uk.pwc.com">tim.ogier@uk.pwc.com</a>
Mark Hughes	Energía y utilities	<a href="mailto:mark.v.hughes@uk.pwc.com">mark.v.hughes@uk.pwc.com</a>
Geoff Lane	Sostenibilidad	<a href="mailto:geoff.lane@uk.pwc.com">geoff.lane@uk.pwc.com</a>
Richard Gledhill	Cambio climático y mercados de CO <sub>2</sub>	<a href="mailto:richard.gledhill@uk.pwc.com">richard.gledhill@uk.pwc.com</a>
John Manning	Regulación y Fiscal en Medioambiente	<a href="mailto:john.r.manning@uk.pwc.com">john.r.manning@uk.pwc.com</a>

© 2007 PricewaterhouseCoopers LLP. Todos los derechos reservados. A menos que se diga lo contrario, PricewaterhouseCoopers se refiere a la firma del Reino Unido PricewaterhouseCoopers LLP (una sociedad de responsabilidad limitada). PricewaterhouseCoopers LLP es una firma miembro de PricewaterhouseCoopers International Limited.



[www.pwc.com/es](http://www.pwc.com/es)

PricewaterhouseCoopers ([www.pwc.com](http://www.pwc.com)) ofrece a las empresas y a la Administración servicios de auditoría, asesoramiento legal y fiscal (Landwell-PwC), consultoría de negocio, asesoramiento en transacciones empresariales y consultoría de recursos humanos especializados en cada sector. Más de 140.000 personas en 149 países aúnan sus conocimientos, experiencia y soluciones para dar confianza e incrementar el valor de sus clientes y stakeholders.

© 2007 PricewaterhouseCoopers. Todos los derechos reservados. PricewaterhouseCoopers se refiere a la firma española y a las otras firmas miembros de PricewaterhouseCoopers International Limited; cada una de las cuales es una entidad legal separada e independiente. \*connectedthinking es una marca registrada de PricewaterhouseCoopers.