

Seguridad energética, desarrollo económico y calentamiento global

Desafíos de corto y largo plazo

Graciela Chichilnisky

Graciela Chichilnisky es UNESCO Professor de Matemáticas y Economía y Directora del Columbia Consortium for Risk Management, Department of Economics and Statistics, Columbia University, New York.

La seguridad energética, el desarrollo económico y la prevención del calentamiento global son objetivos contrapuestos en las economías de combustibles fósiles. Se requieren fuentes de energía alternativas para sostener el desarrollo de largo plazo. Pero en el corto plazo el problema del cambio climático requiere intervenir inmediatamente y con estrategias distintas. Una solución es utilizar fuentes de energía térmica neutrales al carbono para producir electricidad y a la vez capturar del aire y también almacenar dióxido de carbono, un procedimiento que genera más energía y reduce la concentración de carbono en la atmósfera. Este procedimiento cambia por completo la relación entre los tres problemas: sirve para mejorar la seguridad energética e impulsar el desarrollo económico y también para prevenir el cambio climático en el corto plazo. En el largo plazo, puede acelerar la transición hacia fuentes alternativas y es compatible con el desarrollo sostenido. Los desafíos de corto y largo plazo se analizan respecto de estas capacidades en el contexto del mercado de carbono creado por el Protocolo de Kyoto (ONU) y las implicancias para las naciones industriales y en desarrollo de la transición de una economía de energía de origen fósil a otra de energía renovable.

1. Introducción

[1] *NY Times, Sunday May 27th, 2007, "Engulfed by Climate Change, Town seeks Lifeline" by W. Yardley, front page.* El subsuelo bajo el pueblo de Newtok y muchos otros pueblos nativos de Alaska se conoce como permafrost por estar permanentemente congelado pero hoy se derrite por las temperaturas atmosféricas cada vez más elevadas y el recalentamiento del océano. La erosión ya convirtió a Newtok en una isla, el pueblo ahora está debajo del nivel del mar y se hunde. Investigaciones dan cuenta que todo el pueblo habrá desaparecido dentro de una década. El *US Army Corps of Engineers* estimó que trasladar Newtok costaría por lo menos 130 millones de dólares, lo cual equivale a casi 413,000 dólares para cada uno de sus 315 habitantes.

EN EL MOMENTO EN EL CUAL CHINA E INDIA SE DESPLIEGAN GEOPOLÍTICAMENTE y los países en desarrollo rápidamente aumentan su consumo de energía, el mundo se enfrenta por primera vez a las consecuencias sobre el medio ambiente de un largo y exitoso período de industrialización occidental. El momento no podía ser menos oportuno. Dos siglos de industrialización basada en combustibles fósiles arrojaron gran cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera y crearon un riesgo serio de cambio climático. Muchos observadores ya detectan los resultados. Pueblos enteros de Alaska se hunden por el derretimiento del *permafrost* y el recalentamiento de los mares¹ y Florida es la siguiente zona más vulnerable de EEUU. Hoy en día suele aceptarse generalmente que este cambio catastrófico podría ocurrir y la mera posibilidad de ocurrencia exige entrar en acción. Pero, la sed de combustibles fósiles se mantiene firme en el mundo. China construye una nueva fábrica de carbón por semana y el consumidor de EEUU utiliza más energía que nunca, aún con los precios del crudo más altos desde los embargos de la OPEP. La aspiración de autonomía energética crea un incentivo poderoso para utilizar los recursos abundantes de carbón en China como también en EEUU y satisfacer así la rápidamente creciente necesidad de energía².

Los combustibles fósiles entrelazan en un nudo gordiano tres temas globales claves: la seguridad energética, el desarrollo económico y el cambio climático. La era del combustible fósil se enfrenta a una elección cruel: el desarrollo económico y la independencia energética son incompatibles con la estabilidad climática. Es imposible alcanzar los tres objetivos. Los conflictos geopolíticos resultantes toman varias formas. La fuente fósil genera alrededor de 87% de la energía utilizada hoy en el mundo. Debido a que su distribución sobre la superficie terrestre es desigual, se desataron guerras y conflictos, con los consecuentes llamados a la seguridad y autonomía energéticas. Al mismo tiempo el desarrollo económico aún depende crucialmente del consumo de energía, y en la economía de hoy, esto significa combustibles fósiles. A más largo plazo, la única salida es separar el consumo de energía de las emisiones de carbono, es decir, brindar fuentes de energía renovables limpias y abundantes. Pero esto no es posible en el corto plazo debido a la gran escala de la infraestructura fósil que debería reemplazarse: cerca de 40 billones de dólares de hoy y con las tendencias corrientes alrededor de 400 billones de dólares para el fin de siglo³. El corto plazo y el largo plazo presentan distintos problemas y requieren distintas soluciones.

No nos queda mucho tiempo. Científicos del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, Panel Intergubernamental del Cambio Climático)⁴ concordaron que necesitamos estabilizar o reducir la concentración de carbono en la atmósfera durante los próximos 20 años⁵. Evitar nuevas emisiones de carbono decididamente no resuelve el problema de corto plazo. Aún si estabilizamos el actual nivel de emisiones todavía seguimos agregando dióxido de carbono a la atmósfera a una tasa corriente de 24 mil millones de toneladas por año y por ello aumentamos la concentración de carbono. Nuevas fábricas de carbón que limpian el carbono emitido constituyen un adelanto pero crean costos económicos pesados y en cualquier caso solamente estabilizan el crecimiento implacable de la concentración de carbono en sus tasas actuales. Específicamente, estas plantas de carbón operan en contra del objetivo de largo plazo hacia una transición ordenada hacia recursos no fósiles.

Una nueva tecnología⁶ tiene la capacidad de producir electricidad sin emitir carbono y simultáneamente *disminuir* emisiones de carbono por su extracción de aire y almacenaje del emitido por otras fuentes. En este proceso, la concentración de carbono en la atmósfera disminuye mientras se genera energía eléctrica. Esto brinda una verdadera protección contra el cambio climático provocado por el hombre debido a que permite ser neutrales respecto del carbono en el corto plazo y facilita la transición ordenada del corto plazo a un futuro energético diferente que realce la seguridad energética y el desarrollo económico. Este trabajo muestra cómo esta tecnología puede resolver los conflictos globales corrientes y examina las implicancias para el mercado de carbono creado por el Protocolo de Kyoto (ONU) en 1997. Al final del trabajo examinamos las implicancias de utilizar esta tecnología en las naciones industriales y en desarrollo y la dinámica de trasladarnos de una economía basada en fuentes fósiles de energía a otra de energía renovable.

2. Metas de corto plazo y objetivos de largo plazo

Una transición en el largo plazo desde combustibles fósiles hacia fuentes alternativas de energía⁷ distribuidas con mayor amplitud pueden brindar desarrollo y seguridad económica sin generar calentamiento global. El apartamiento de las fuentes fósiles parece inevitable en el largo plazo porque su oferta es limitada.

[2] Se espera que el consumo de energía se multiplique entre cinco y diez veces durante este siglo, véase 1. P. Eisenberger and G. Chichilnisky (2007) "Reducing the Risk of Climate Change while Producing Renewable Energy" Columbia University, May 2007. La industria del carbón estadounidense recientemente presentó un ambicioso plan para asegurar cuantiosos subsidios para producir carbón aduciendo autonomía energética.

[3] US Department of Energy (DOE), 2006, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/index.html>, table A1.

[4] También denotado IPCC. La autora de este artículo se desempeñó como directora del IPCC.

[5] Para simplificar la exposición utilizamos el término "carbono" para significar "dióxido de carbono", aunque existen otros gases de invernadero para considerar como el metano.

[6] Introducido por Eisenberger and Chichilnisky, 2007, op.cit.

[7] Como el viento, masa biológica, hidroelectricidad, energía solar, geotérmica, nuclear y hasta posiblemente, la fusión.

Fuentes alternativas de energía son una condición necesaria para un desarrollo sustentable en el largo plazo, y la demanda mundial de energía que crece rápidamente requerirá una variedad de fuentes alternativas. La oferta de energía no es el problema. La energía solar, por si sola, puede multiplicar la electricidad fácilmente por diez utilizando sólo el 2% de la energía que alcanza la superficie terrestre.

No importa cuán optimista se pueda ser en el largo plazo, es importante comprender que la solución del largo plazo *no* es adecuada en el corto plazo. Se espera que la transición hacia fuentes alternativas de energía lleve mucho tiempo por cuanto la mayor parte de la energía utilizada en el planeta hoy se obtiene de combustibles fósiles como el petróleo y el carbón⁸. Como se señaló anteriormente la transición tomará tiempo y requiere una nueva infraestructura tan colosal como costosa.⁹ Pero mientras sigamos utilizando combustibles fósiles y emitamos carbono aumentaremos la concentración de gases de invernadero y el riesgo de un cambio climático catastrófico.¹⁰ Estabilizar el nivel de emisiones sin duda es de gran ayuda, pero estabilizar el nivel corriente de 24 mil millones de toneladas de dióxido de carbono emitido por año continuará cargando la atmósfera de dióxido de carbono y aumentará el riesgo. Debido a ello el IPCC asevera que necesitamos disminuir las emisiones de dióxido de carbono entre 60% y 80% dentro de los próximos quince a veinte años.¹¹ Queda claro que las políticas públicas de largo plazo no son suficientes. Se requiere una acción inmediata para atender el riesgo de cambio climático.¹²

Atender riesgos catastróficos no es una novedad. Es cuestión de rutina asegurarnos contra terremotos e inundaciones y los nuevos códigos edilicios mitigan pérdidas potenciales.¹³ Sin embargo la novedad y magnitud de los riesgos de cambio climático requieren formas más sofisticadas de toma de decisión que las utilizadas para riesgos más comunes. A tal efecto dividimos el problema en metas de corto plazo y objetivos de largo plazo; demostramos que son problemas nítidamente diferentes y analizamos ambos,¹⁴ incluyendo el desafío de la transición de las estrategias de corto a largo plazo.

El problema de corto plazo es agudo y nos apremia la urgencia. Como se ha señalado anteriormente, una disminución rápida y drástica de las emisiones no es factible debido al enorme tamaño de la infraestructura fósil que debe reemplazarse.¹⁵ Ciertamente, los países ricos y los pobres podrían ser gravemente afectados por disturbios económicos originados ante una disminución drástica de la utilización de combustibles fósiles. Países de crecimiento rápido como China e India dependen fuertemente del carbón como también EEUU y Rusia. No parece factible disminuir drásticamente la utilización de combustibles fósiles en el corto plazo, por lo cual aumenta la convocatoria para capturar el carbono emitido por fábricas con combustibles fósiles y almacenarlo con la debida precaución.

Parece claro entonces que dos problemas –administrar los riesgos en el corto y largo plazo– son sustancialmente diferentes y requieren distintas soluciones. Para el largo plazo se requiere una transición hacia una economía de combustibles no fósiles, una que pueda acomodar las necesidades rápidamente crecientes de 80% de la población mundial que se inicia en la senda de industrialización que llevará a decuplicar la demanda energética dentro de este siglo. Pero para el corto plazo necesitamos en cambio continuar con la utilización de la energía de combustible fósil y una *disminución* del contenido de carbono de la atmósfera del planeta. Se trata de un gran desafío y es el tema de este trabajo.

[8] 87% de la energía utilizada hoy proviene de combustibles fósiles y menos del 1% de fuentes renovables, 0,01% es energía solar.

[9] Véase el *cuadro 1* a continuación y Eisenberger and Chichilnisky, 2007, op. cit.

[10] Los científicos concuerdan que necesitamos considerar la posibilidad de un “punto de inflexión”, a saber, un nivel de calentamiento que dispare un cambio climático catastrófico que es típico de sistemas físicos con efectos de retroalimentación complejos. Suele creerse que el clima de la tierra es uno de este tipo de sistemas. Por lo general, se considera que estos riesgos tienen “colas pesadas” de manera que la posibilidad de eventos extraños resulta mucho mayor que lo esperado.

[11] En la actualidad 40% de las emisiones hacia afuera sale naturalmente de la atmósfera y queda almacenada en los océanos. Sin embargo, en el largo plazo, puede ocurrir que no podamos contar con esta dinámica porque en el pasado también ocurrió lo contrario: los océanos y la tierra almacenaron menos carbono con lo cual aumentó su concentración atmosférica.

[12] A medida que alcancemos las 500 partes de carbono por millón, se espera que la temperatura media aumente 3 grados centígrados, lo cual significa un aumento de temperatura cerca de tres veces en las capas polares disparando así un aumento en el nivel del mar.

[13] Los terremotos son riesgos infrecuentes y el riesgo de terremoto para cualquier localidad específica es extremadamente pequeño.

Resulta crítico que las metas de corto plazo sean compatibles con los objetivos de largo plazo para evitar la trampa de malograr objetivos de largo plazo al focalizar solamente sobre objetivos de corto plazo. Capturar dióxido de carbono directamente de fábricas de energía a base de combustibles fósiles puede demorar el momento de reconsideración pero afecta adversamente el objetivo de largo plazo de reemplazar combustibles fósiles por fuentes neutrales al carbono.

La estrategia tecnológica debería acomodar ambos objetivos de corto y largo plazo, y también la transición del corto plazo al largo plazo. Es un pedido exigente porque semejante tecnología debería facilitar simultáneamente la transición hacia fuentes alternativas que provean aumentos masivos en la oferta energética para el largo plazo, mientras en el corto plazo permite la utilización continuada de combustibles fósiles y disminuye el contenido de carbono en la atmósfera del planeta.

Analizamos una tecnología que brinda esta combinación, utilizando energía renovable para producir electricidad y capturar y almacenar dióxido de carbono a la vez.¹⁶ Semejante combinación es inusual y se contrapone con las realidades físicas de las economías de combustibles fósiles, donde cuanto más energía se produce, más dióxido de carbono se emite. La tecnología propuesta tiene la propiedad de reducir el contenido de carbono en la atmósfera cuanto más energía eléctrica se genera. Un resumen de esta tecnología y una evaluación de sus costos se brinda en el recuadro 1. Falta examinar la factibilidad económica y política.

Estimamos los costos de corto y largo plazo de un proceso que a la vez genere electricidad y capture y secuestre carbono, utilizando energía solar térmica como insumo.¹⁷ Se examinan los costos totales de reducir el dióxido de carbono en la atmósfera según lo solicitado por el IPCC, habida cuenta del aumento por diez en la utilización de energía pronosticado para el resto de este siglo. Finalmente analizamos las implicancias de semejante transición tecnológica sobre la economía global y para la continuación de las negociaciones internacionales sobre el clima, incluyendo en particular el mercado de carbono creado por el Protocolo de Kyoto de las Naciones Unidas a partir de 2012.

3. Administración del riesgo de largo plazo - *learning by doing*

Los temas de largo plazo suelen tratarse con mayor frecuencia en la literatura y brindan el mejor punto de partida. Esta sección examina los costos de prevenir los riesgos del calentamiento global en el largo plazo, explorando vías para asegurar que los beneficios esperados superen los costos esperados. Una manera de evitar en el largo plazo el riesgo del cambio climático es transitar de los combustibles fósiles a los alternativos y, para este propósito, debemos predecir el costo futuro de la generación de energía utilizando fuentes alternativas.

Sólo 6% de la energía utilizada en el mundo es hidroeléctrica, al igual que la energía nuclear, y las fuentes renovables solo contribuyen con 1% de la generación de energía mundial hoy en día. Necesitamos una metodología para predecir los costos futuros esperados de la generación de energía por parte de fuentes alternativas porque la utilización de dichas fuentes aumenta considerablemente, a saber, se multiplica por diez para satisfacer las necesidades de hoy pero se multiplica por cien para enfrentar las necesidades de fin de siglo. Una metodología ampliamente aceptada para cumplir con este objetivo es "la curva de aprendizaje", que se utiliza frecuentemente para predecir

[14] Aquí utilizamos un enfoque para la toma de decisión en situaciones introducido en G. Chichilnisky "An Axiomatic Approach to Choice under Uncertainty with Catastrophic Risks" *Energy and Resource Economics*, 2000, G. Chichilnisky, "Catastrophic Risks", *Encyclopedia of Environmetrics*, 2002, and G. Chichilnisky "The Topology of Fear" Working Paper, Columbia University, 2006. Plantea la necesidad de considerar simultáneamente eventos frecuentes e infrecuentes utilizando para cada caso herramientas de decisión apropiadas según los tiempos y la escala comprometidos.

[15] Alejarse de los combustibles fósiles por poco tiempo podría aumentar el riesgo de disturbios sociales, lo cual sería una catástrofe en sí misma, debido a que la mayor parte de la vida humana depende de la energía.

[16] Eisenberger and Chichilnisky, 2007, op. cit.

[17] Otras fuentes de energía que producen energía térmica antes de generar electricidad pueden utilizarse de manera similar, Eisenberger and Chichilnisky, 2006 op. cit.

[18] Véase Andy S. Kydes, "Modeling Technology Learning in National Energy Modeling Systems", EIA/DOE-0607(99) La metodología general se llamó "learning by doing" y fue introducida en la literatura económica por Kenneth Arrow en 1952. Los datos utilizados en el artículo provienen del US Department of Energy, véase Eisenberger and Chichilnisky, 2007. Una ilustración de esta metodología para el caso de energía solar que muestra "curvas de aprendizaje" del Department of Energy se encuentra en H. Price et al "The Potential for Low Cost Concentrating Solar Power Systems" National Renewable Energy Laboratory Report NREL/CP-550-26649; y <http://www.nrel.gov.csp>

el aumento de eficiencia de una tecnología a medida que se expande la capacidad de producción.¹⁸ Muestra cómo la eficiencia aumenta a mayor capacidad, o su equivalente, cómo el costo de producir energía disminuye a mayor capacidad instalada.

Debido a que nos concentramos en el largo plazo, tomamos en consideración que la fuente alternativa debería ser capaz de generar entre cinco y diez veces la energía utilizada hoy en el mundo. Esta es una proyección estándar de la demanda energética para fin de este siglo, como señalamos anteriormente. Ninguna de las energías alternativas (eólica, geotérmica, biomasa, hidroeléctrica o nuclear) puede brindar esta posibilidad por sí misma - ya sea porque no cuenta con la capacidad instalada o porque si contara con la misma se crearían otros problemas. Por ejemplo, generar energía a partir de biomasa compite con la producción de alimentos y es mucho menos eficiente por metro cuadrado que la energía solar (sólo alrededor de 3% del potencial de energía solar para la misma superficie), y la energía hidroeléctrica carece de capacidad instalada y produce un impacto ambiental. Pero la energía solar podría atender la demanda con un impacto limitado. Una combinación de todas estas fuentes de energía que incluye la solar podría entonces ofrecer una solución de largo plazo razonable.

El cómputo de *costos de transición de largo plazo* se simplifica considerablemente si observamos que, en una economía de mercado competitiva, siempre se impondrá el costo alternativo más bajo. Ante esta realidad, el costo comprendido en la transición hacia fuentes de energía renovables puede acotarse por el costo de una transición hacia una única fuente, como térmica solar, que puede ofrecer una solución completa en sí misma. A efectos de ofrecer una estimación conservadora, consideramos los costos comprendidos en una transición hacia la generación de electricidad para el largo plazo de una fuente térmica y comparamos sus costos con el combustible fósil más eficiente en cuanto a costo utilizado en el día de hoy, a saber el carbón, que se utiliza como variable representativa para combustibles fósiles. Para resumir: estimamos los costos de largo plazo al computar los costos de abandonar la electricidad generada por carbón y de generarla, a su vez, por energía solar.

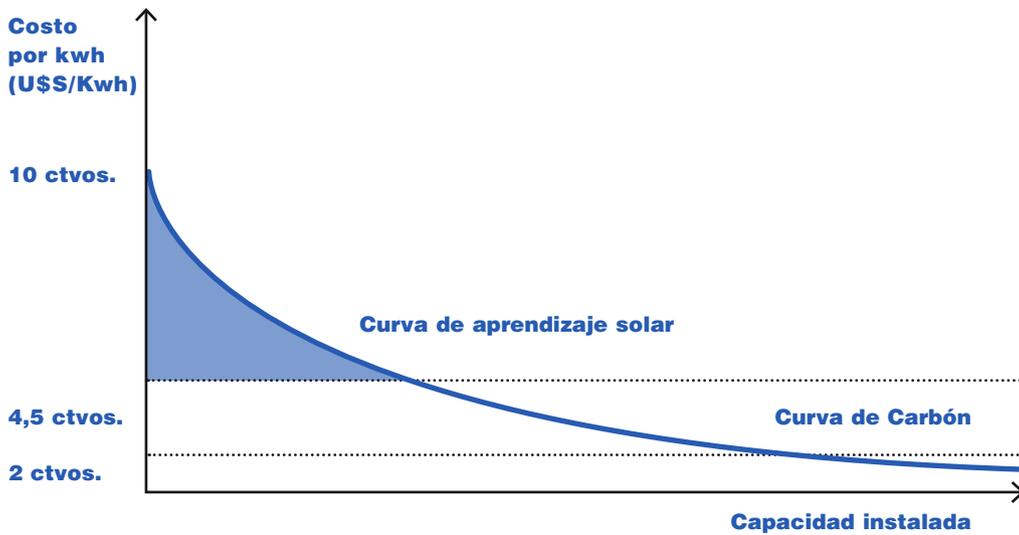
Es apropiado reducir el cómputo a una medida estándar de energía como electricidad, porque se utiliza en todo el mundo y ofrece una medida universal y flexible de la disponibilidad de energía. En el caso de los combustibles fósiles consideramos los costos de generar un kwh de electricidad.

Para estimar la evolución futura de los costos de electricidad generada por carbón a electricidad generada por energía solar, utilizamos el enfoque de la curva de aprendizaje para las dos tecnologías señaladas anteriormente. Resulta que la curva de aprendizaje para el carbón es bastante horizontal, debido a que la mayor parte del aprendizaje ya se logró por la enorme capacidad instalada de la industria. No ocurre así para la energía solar. Sólo 0,01% de la electricidad mundial suele generarse con energía solar, y en particular la tecnología denominada *Concentrated Solar Power Parabolic Trough*, también identificada como CSP PT, en tren de evaluación representa solamente 10% de la capacidad instalada de energía solar.¹⁹ Correspondientemente, la curva de aprendizaje del CSP PT es bastante vertical. Esto significa que a medida que se expande la capacidad instalada, se espera que los costos de electricidad caigan rápidamente y los correspondientes al carbón permanecerán aproximadamente al mismo nivel de hoy porque ya se beneficiaron del aprendizaje. La *figura 1* muestra la evolución de la eficiencia CSP PT²⁰ para generar electricidad cuando se expande la capacidad instalada, según el pronóstico del US Department of Energy.

[19] Véase H. Price et al, *op cit.*

[20] Para ambos: el Fotovoltaico Solar y CSPPT, es decir, "Concentrated Solar Power Parabolic Through"

Figura 1



Los costos de largo plazo de la transición de generar electricidad con carbón a generar electricidad con energía solar quedan representados por la superficie sombreada por encima de la semirrecta de los U\$S 4,5 centavos y por debajo de la curva de aprendizaje solar.²¹

Específicamente, el US Department of Energy (DOE) demostró que a medida que aumenta la capacidad instalada de plantas solares con CSP PT el costo de la energía solar²² cae 15% cada vez que se duplica la capacidad.²³ Esto se ilustra en la *figura 1*, donde comparamos las curvas de aprendizaje de la generación de energía por carbón y la solar. En el caso del carbón, los costos al día de hoy son muy bajos (cerca de U\$S 4,5 centavos por kwh) pero debido a todo el aprendizaje ya logrado en la tecnología del carbón se espera que los costos permanezcan constantes en torno a ese valor. En el caso de la energía solar, sin embargo, los costos de hoy son más del doble del costo de carbón pero en el largo plazo se espera que alcancen un valor entre U\$S 0,02 y U\$S 0,03, que es aproximadamente la mitad del costo del carbón por kwh.²⁴ Como se ha analizado anteriormente, en una economía de mercado competitiva suele suponerse que las alternativas de más bajo costo prevalecerán en el largo plazo. Por lo tanto podemos suponer que en cuanto el costo de la energía solar iguale o sea inferior al costo de la energía generada por el carbón, a saber, menos de U\$S 4,5 centavos por kwh, la generación solar de electricidad u otras fuentes alternativas de energía se adoptarán ampliamente, brindando de esta manera en nuestro modelo una transición de mercado hacia fuentes renovables. Por lo tanto, si uno se centrara exclusivamente en el largo plazo, el costo de la transición puede medirse como el costo adicional total de utilizar en nuestro ejemplo energía solar para generar electricidad *sólo durante el período cuando estos costos superan el costo de generar electricidad utilizando carbón*. En otras palabras: en el largo plazo se mide el costo total esperado del traspaso de la energía fósil a la renovable, como la integral del período relevante de la diferencia entre lo que cuesta la energía solar y la generada por el carbón. El período relevante es aquel durante el cual los costos de la generación de electricidad con energía solar superan a los costos con carbón.

Es importante recordar que el *período relevante* se define no en términos de tiempo sino de capacidad instalada. Las curvas de aprendizaje utilizadas en la *figura 1* representan la evolución de costos (solar, carbón) respecto de la capacidad instalada y no respecto del tiempo. Sin embargo, ambos pueden compararse, debido a que hay un límite a la cantidad de capacidad que puede construirse en cada período.

[21] Los recursos renovables distintos de la energía solar también pueden reducir el costo de producir electricidad a medida que se expande la capacidad instalada. Los 148 millones de dólares adicionales estimados aquí son en realidad un límite superior, considerando que tan sólo la energía solar puede alcanzar esta eficiencia de costos. También vale la pena observar que las fuentes de combustibles fósiles como el carbón probablemente aumenten en el futuro cercano porque las fuentes más accesibles y fáciles de procesar son una proporción pequeña de la oferta total y se estima que sólo 17% de los combustibles fósiles disponibles son recursos de alta calidad.

[22] CSPPT

[23] Cf, DOE op. cit. y Eisenberger and Chichilnisky op. cit.

[24] Eisenberger and Chichilnisky 2007. Para consideraciones económicas sólo se requiere que las fuentes alternativas sean competitivas con la generación de electricidad por combustibles fósiles.

[25] Esta cifra se refiere al caso de energía termosolar como fuente de la generación de electricidad, Eisenberger and Chichilnisky, 2007. No se aplica a la electricidad generada por carbón, para la cual los costos variables alcanzan el 33% de los costos variables del carbón en sí mismo ni para la electricidad producida por petróleo donde la participación de la materia prima es aún mayor.

[26] El *cuadro 1* resume resultados de Eisenberger and Chichilnisky, 2007 y los supuestos que le dieron origen se encuentran en el texto.

[27] Basado en la producción mundial de electricidad de hoy de $1,5 \times 10^{14}$ kWh. Se supone que cada planta produce $0,7 \times 10^9$ kWh por año, cf. Eisenberger and Chichilnisky op.cit.

[28] La cifra debe ajustarse por el costo de estabilizar las emisiones totales a los niveles de hoy, véase Pacala and Socolow 2004. Se basa en la captura y el almacenaje de 24 giga toneladas de carbono anualmente a un costo de aproximadamente 8 dólares por tonelada.

[29] Los costos de capital comprenden el costo de construir la planta. Las cifras presentadas aquí no incluyen el ingreso que proviene de la venta de electricidad ni el carbono capturado. La solución termostática global podría brindar beneficios casi inmediatos por la generación de electricidad y la venta de créditos por carbono en el mercado de carbono..

[30] El rango de 200 a 400 billones de dólares representa la concesión para el aumento de energía que se espera en el largo plazo. Por ejemplo, el costo de capital de 400 billones de dólares representa la multiplicación por 10 requerida para satisfacer el aumento de la demanda energética estimado en 2,7% anual hasta fin de siglo.

[31] Este costo de capital se postula a partir de 200 millones de dólares por planta, bajo los supuestos del pie de página 17 más arriba, véase Eisenberger and Chichilnisky 2007.

El problema puede visualizarse geoméricamente midiendo el costo de largo plazo de la transición de energía fósil a la renovable como la superficie del triángulo sombreado de la *figura 1* acotado por debajo del precio del kwh de carbón hoy (U\$S 4,5 centavos) y por arriba del costo decreciente de un kwh que se espera de las curvas de aprendizaje de DOE para la electricidad generada por energía solar a medida que aumenta la capacidad instalada. Al tomar en consideración las curvas de aprendizaje de DOE para energía de fuente fósil y solar, a medida que nuevas plantas solares se construyen esta superficie sólo representa 148 millones de dólares. Este es el costo esperado de largo plazo de cambiar de combustibles fósiles a energía solar. En muchos países en desarrollo fuentes alternativas como CSP ya son competitivas porque carecen de combustibles fósiles y adquirirlos y transportarlos es costoso.

El valor del costo de transición de largo plazo recién consignado es más bien pequeño y por lo tanto tranquiliza los ánimos en cuanto a resolver los problemas de largo plazo.

Sin embargo se presenta una pregunta importante: si la transición de largo plazo hacia fuentes de energía alternativas puede lograrse a tan bajo costo, ¿por qué no utilizar el mismo método para el corto plazo? Porque, sencillamente, esta solución no funciona para el corto plazo debido a que los supuestos no se mantienen en el mismo. Por ejemplo, eliminamos del cómputo anterior los costos fijos de construir nuevas plantas para fuentes de energía alternativas y lo hicimos sobre la base de que los mismos quedan casi totalmente absorbidos en el largo plazo por los costos variables de vender electricidad por kwh. Se trata de una práctica estándar, de hecho 90% de los U\$S 4,5 centavos por kwh mencionados anteriormente para la electricidad generada por energía solar representa la amortización de costos fijos.²⁵ Sin embargo, si se aplica al corto plazo deben considerarse los costos fijos los cuales, como se indica a continuación en el *cuadro 1*, pueden ser enormes, a saber: entre U\$S 200 y 400 billones para la solución de largo plazo.

Los valores del *cuadro 1* a continuación se computaron sobre la base de la cantidad de 400MW CSP PT plantas que se necesitarían para atender el aumento de largo plazo de utilización de energía para el resto del siglo, esperando que se multiplique entre cinco y diez veces, como también la cantidad de plantas requeridas en el corto plazo para extraer el nivel actual de emisiones de dióxido de carbono de 24 mil millones de toneladas por año. El costo de capital por planta se estimó a partir de un desempeño de 3 centavos por kwh y 8 dólares la tonelada de carbono extraído, ambos logrados después del aprendizaje, estos son los principales costos de capital e implican aproximadamente 200 millones de dólares de capital por planta de 400 MW CSP PT.

La cifra de 200 a 400 billones de dólares del *cuadro 1* representa la capacidad instalada requerida para atender el aumento de la demanda energética en el largo plazo de entre 5 y 10 veces y, claramente, no es realista para la transición de corto plazo debido a que es mayor que el PIB de todo el mundo, no obstante ser adecuado para el largo plazo.

Cuadro 1. Cantidad de plantas y costos fijos requeridos en el corto y largo plazo²⁶

	Largo Plazo	Corto Plazo
	Plantas CSP PT	Plantas termostáticas globales
Plantas Requeridas	1.000.000 - 2.000.000 ²⁷	15.000 ²⁸
Costos de Capital ²⁹	200 a 400 billones de dólares ³⁰	3 billones de dólares ³¹

Existen otras maneras de ilustrar la diferencia entre cuestiones de corto y largo plazo. Los costos consignados en el *cuadro 1* comprenden reemplazar la electricidad generada por el carbón por aquella generada por la térmica solar y la comparación puede ser problemática por cuanto las soluciones de largo plazo no son compatibles con las de corto plazo. Por ejemplo, en el corto plazo ciertos sectores que utilizan combustibles fósiles no pueden utilizar electricidad, a saber, el transporte que representa cerca de 28% del consumo total de energía. El transporte es una de las utilidades de energía que más aumenta en el mundo hoy y la electricidad producida por energía solar no podría reemplazar la de combustibles fósiles en el corto plazo en el sector de transporte. Por lo tanto la metodología utilizada anteriormente sólo podría tratar con alrededor de 70% del carbono emitido hoy, aunque es realista suponer que en el largo plazo podría tratar con todas las emisiones.³² Por estas razones, y otras, el problema de largo plazo tiene una solución de largo plazo que parece económica y razonablemente fácil de conseguir, pero se requiere una solución diferente para el corto plazo para evitar los riesgos del calentamiento global. Este será el tópico de la siguiente sección.

[32] Las fuentes de energía alternativas pueden utilizar dióxido de carbono extraído de la atmósfera e hidrógeno creado por electrólisis del agua para hacer un combustible fósil renovable mediante el proceso de Fischer-Propisch, cf. Eisenberger and Chichilnisky, 2007.

4. Administrar los riesgos de corto plazo

Los supuestos planteados hasta aquí son válidos para el largo plazo. Por ejemplo, supusimos que en un mercado competitivo prevalecerá la tecnología de costos más bajos, lo cual es un supuesto de largo plazo. Utilizamos una curva de aprendizaje como si el mismo estuviera difundido uniformemente en todo el mundo, lo cual solamente puede ocurrir en el largo plazo.

En el corto plazo se esperan acontecimientos más desparejos y desordenados. Habrá prueba y error y una competencia feroz entre las distintas fuentes de energía, fuentes de combustibles fósiles y energía renovable, con muchos esfuerzos iniciales apareciendo, fracasando y finalmente desapareciendo. No importa cuán confiables sean las curvas de aprendizaje DOE, no parece posible computar los costos actuales de prevenir riesgos como si la economía automáticamente eligiera el sendero más eficiente en el corto plazo. Tampoco es realista pensar que el mundo es uniforme en términos de recursos o capacidad organizativa. De manera que esta tecnología al igual que otras alcanzará los distintos países del mundo a distintas tasas, habiendo quienes la incorporen primero y otros que esperarán detectar desenlaces exitosos antes de iniciarse a su vez.³³

[33] A. Grubler *Long Wave: Technology Diffusion and Substitution* Daedalus, Summer July 1st, 1996.

Por lo tanto en el corto plazo una estimación de los costos de administración de riesgos se logrará de manera diferente. La justificación de nuestro enfoque es que para el corto plazo podemos brindar una *cota inferior realista* para administrar el riesgo del calentamiento global al indicar una posible solución y maneras de implementarla. La tecnología de producción conjunta utiliza un proceso específico que es práctico y adecuado para el doble problema a resolver, a saber, aumentar las existencias de energía en el corto plazo y disminuir el carbono en la atmósfera y, por ende e inmediatamente, disminuir el riesgo de calentamiento global. En un mercado competitivo con suficiente información, los costos realizados no deberían exceder significativamente una cota inferior factible.

Para brindar una estimación de los costos comprendidos utilizamos nuestro conocimiento actual sobre el aprendizaje, el cual como ya se mencionó predice costos

[34] Véase Nicholas Stern, *The Economics of Climate Change* Cambridge University Press, 2006, Chapter 6, p. 188-189 y S. Pacala and R. Socolow, "Stabilization Wedges: Solving Climate Problem for The Next Fifty Years with Current Technologies Science Vol. 305 (August 13, 2004), 268-272.

esperados de generación de energía para distintas capacidades instaladas. En la próxima sección comparamos estos costos de administración de riesgo de corto plazo con primas de seguro estándares, comercialmente competitivas, que se aceptan en todo el mundo para cubrir riesgos patrimoniales, ya sea en situaciones catastróficas o no. Además supondremos que se instrumenta una política pública para estabilizar las emisiones de carbono a los niveles actuales.³⁴ En la actualidad estamos emitiendo en términos netos anualmente alrededor de 24 giga toneladas de carbono. Supondremos de ahora en más que deberemos capturar y secuestrar ese monto de emisiones anualmente.

Es importante observar que la necesidad de generar electricidad conjuntamente con la captura y el almacenamiento de carbono utilizando este enfoque es limitado y tiene un fin natural cuando lleguemos a la neutralidad del carbono, es decir, cuando no agreguemos más CO₂ en términos netos a la atmósfera. El termostato global avanza al aumentar la capacidad instalada de plantas de energía solar y las facilidades creadas pueden eventualmente reemplazar los combustibles fósiles como fuente de energía. Una vez que la capacidad construida logró el tamaño adecuado, ya no se requieren más combustibles fósiles para generar electricidad. Si cubrimos nuestras necesidades crecientes de energía con recursos alternativos y renovables, y cerramos las fuentes de combustible fósil cuando amorticen sus inversiones, reduciremos la necesidad de extraer CO₂ de la atmósfera para el fin de siglo, aunque podamos necesitar protegernos del cambio climático por otras razones. En otras palabras, la solución se convierte naturalmente en una manera de brindar energía renovable a nivel global sin utilizar combustibles líquidos y, por lo tanto, sin emisiones adicionales problemáticas de carbono. Esta solución entonces satisface nuestro requisito de que las políticas de corto plazo deberían facilitar en vez de malograr la consecución de objetivos de largo plazo.

Los costos económicos comprendidos en todo el proceso termostático global se examinan a continuación, al igual que las consecuencias de la economía de los mercados de carbono que se crearon en 1997 en el Protocolo de Kyoto por Naciones Unidas los cuales se analizan en las dos últimas secciones.

En el *cuadro 1* se muestra el costo de capturar y secuestrar 24 giga toneladas de carbono anualmente siguiendo los supuestos planteados anteriormente.³⁵

[35] El cómputo y los supuestos detallados se brindan en Eisenberger and Chichilnisky, 2007, op. cit.

5. Prima por riesgos de catástrofe en el cambio climático

Un informe reciente ampliamente difundido³⁶ brindó nuevas estimaciones sobre los costos potenciales del calentamiento global. Aunque su marco es bastante diferente del adoptado aquí, podemos estimar los riesgos de corto plazo del cambio climático en términos del valor de la pérdida de propiedad que entra en juego en los casos de riesgo catastróficos, que se computó en aproximadamente 20% del PBI mundial ahora y en el futuro cercano. Este número nos permite evaluar el alcance del ajuste de la solución de corto plazo propuesta en este trabajo con los modelos estándares de administración de riesgo, como los brindados por el seguro patrimonial en el caso de riesgos catastróficos.³⁷ A efectos de comparar los costos con enfoques estándar de seguros, brindamos ahora porcentajes que representan la prima anual dividida por el monto asegurado o el valor asegurado en una variedad de riesgos inmuebles:

[36] Nicholas Stern *The Economics of Climate Change* Cambridge University Press, 2006, Chapter 6, p. 188-189.

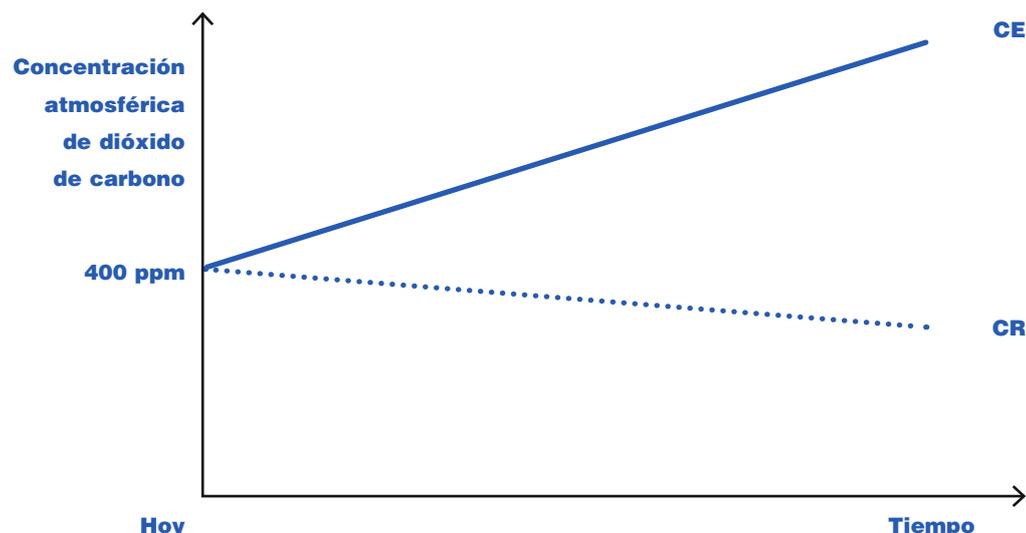
[37] Una advertencia se requiere cuando se comparan los costos de asegurar con el costo de la supresión del carbono: dicha supresión puede no llevar a una reducción de un dólar por cada dólar de disminución de prima de seguros y, por supuesto, los beneficiarios pueden no ser los mismos en ambos casos.

Cuadro 2. Primas patrimoniales sobre riesgos estándar y catastróficos

	Porcentaje pagado para proteger el monto asegurado	Prima media de asegurar 1.000 dólares
Inundación ¹	entre 2,2% y 2,8%	entre 22 y 28 dólares
Terremoto ²	entre 1,0% y 2,2%	entre 10 y 22 dólares
Básico de vivienda ³	entre 0,2% y 0,7%	entre 2 y 7 dólares

1. FloodSmart.gov. 2. California Department of Insurance. 3. California Department of Insurance and National Association of Insurance Commissioners (las dos fuentes difieren en 0,1 dolar) http://www.aic.org/Releases/2007_docs/NAIC_Releases_Homeowners_Ins_Report.htm, and http://www.naic.org/documents/research_stats_homeowners_sample.pdf

Figura 2



CE = Carbono evitado: reduce las emisiones pero la concentración de carbono sigue aumentando
 CR = Carbono reducido: reduce la concentración mediante la captura del CO2 del aire

En el *cuadro 1* de la sección anterior brindamos una estimación de los costos de utilizar el enfoque del termostato global para prevenir los riesgos de corto y largo plazo del calentamiento global. Tomando en cuenta la evaluación de Stern los costos potenciales comprendidos en el caso de catástrofes³⁸ alcanzan cerca de 20% del PBI global o cerca de 12 billones de dólares³⁹, mientras que la prima anual implícita en el termostato global según informado en Eisenberger y Chichilnisky (2007) es 200 mil millones de dólares, computado como el costo de capturar y almacenar 24 giga toneladas por año a un costo de 8 dólares la tonelada. Este costo anual es menor que la prima de mercado cobrada hoy por la administración de riesgo de una cantidad de activos reales de los mercados de seguros corrientes que, como se observa en el cuadro anterior, alcanzaría alrededor de 2,5% de los 12 billones de dólares, o sea una prima anual de cerca de 288 mil millones de dólares. Vale la pena mencionar que este cómputo de corto plazo puede no ser válido en el largo plazo, porque al computar los costos supusimos emisiones de carbono a los niveles corrientes, aproximadamente 24 giga toneladas de carbono por año, un supuesto que es realista en el corto plazo pero puede no ser tan realista en el largo plazo.

[38] Stern, op. cit., 2006, chapter 6.

[39] El PBI global corriente es de alrededor de 62 billones de dólares; 20% del mismo entonces es 12 billones de dólares.

Al mismo tiempo parece justo observar que el enfoque del termostato global brinda algo más que el de seguros. En efecto brinda una solución para el problema del calentamiento global en el corto plazo, que puede ser más valioso que el enfoque

de los seguros que meramente compensa las pérdidas. Esta distinción también es importante al considerar el precio de mercado del *carbono evitado* que deja las emisiones corrientes y la acumulación continua en la atmósfera constante versus la *reducción del carbono* que reduce actualmente el nivel corriente de emisiones y hasta *reduce el total de la concentración de carbono* en la atmósfera del planeta reduciendo, por lo tanto, el riesgo del cambio climático. La *figura 2* ilustra los tres casos, sólo el tercero puede prevenir el cambio climática en el corto plazo.

6. El mercado de carbono y su impacto en la supresión de emisiones globales

Un incentivo económico clave para lograr la transición de los combustibles fósiles y disminuir emisiones de carbono fue brindado por la creación de la llamada “señal de precios” para el carbono. Estos son costos de emitir carbono impuestos por acuerdos internacionales recientes que resultaron en la creación de un *mercado de carbono* que fue propuesto y redactado en el Protocolo de Kyoto por quien escribe, y adoptado y firmado por 196 países en diciembre de 1997. En términos simples, la emisión se desincentiva cuando se cobra al emisor un precio por cada tonelada de carbono emitida, precio determinado por la oferta y demanda del mercado de carbono creado a tal efecto.⁴⁰

El mercado de carbono nació de los compromisos de los gobiernos para reducir las emisiones totales de carbono. Los compromisos surgieron de la Convención Marco del Cambio Climático de la ONU en 1992 y su Protocolo de Kyoto de 1997 y de las restricciones europeas al carbono para los generadores e industria de la electricidad comprendidas en el Esquema de Intercambio de Emisiones de la Unión Europea, (EU ETS), y la ratificación del Protocolo de Kyoto en ley internacional en 2006.

Es importante reconocer que antes que pueda existir y operar este mercado, debe existir un acuerdo firme entre las partes para reducir el total de emisiones. Esto significa que *un límite numérico estricto sobre las emisiones totales debe acordarse entre los traders*. Caso contrario, no hay mercado de carbono.⁴¹ Esta característica hace este enfoque más atractivo que los impuestos cuando se requieren límites amplios a las emisiones como se requieren ahora. Los impuestos no aseguran cotas a ningún tipo de emisión, como lo hacen los mercados.⁴² El mercado de carbono tiene características únicas que lo distinguen de otros mercados y se analizarán más adelante. En especial, brinda un tratamiento preferencial para países pobres, de manera que aumenta la eficiencia de mercado aunque se espera que a medida que alcancen el mismo nivel de desarrollo de los demás, se enfrentarán con cotas similares. Ningún otro mercado tiene estas características.

¿Qué intercambian los *traders* de carbono? Los *traders* compran los derechos para emitir por encima de sus cotas o venden derechos para emitir debajo de sus cotas. El mercado asegura un techo global total sobre las emisiones que el intercambio de derechos no modifica. Por esta razón, el enfoque de mercado asegura un techo total a las emisiones globales de aquellos que participan. En la actualidad ni los EEUU (que emite cerca de 31% de las emisiones de carbono globales totales) ni los países en desarrollo (que en total emiten un monto similar) respetaron estas *cotas* a pesar de suscribir el Protocolo de 1997. El Protocolo de Kyoto comprende al momento menos de 40% de las emisiones globales de carbono.

[41] Véase G. Chichilnisky *The Greening of the Breton Woods*, Financial Times, January 1996, G. Chichilnisky *Key Note Speech*, Annual Meeting of The World Bank, Washington D.C., December 1996, G. Chichilnisky and G. M. Heal *Environmental Markets: Equity and Efficiency*, Columbia University Press, New York, 2000, G. Chichilnisky and G. M. Heal *Markets for Tradable CO2 Emission Quotas: Principles and Practice*, OECD, Paris, Economic Development Working Paper No. 153, and Chapter 10 in *Topics in Environment and Resources*, (M. Bonnan et al) Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1999, G. Chichilnisky *North-South Trade and the Global Environment* American Economic Review Vol. 84, No. 4, September 1994, pp. 851-974, and K. Capoor and P. Ambrosi, *State and Trends of the Carbon Market 2007*, The World Bank, Washington D.C., May 2007.

[42] Esta estipulación figuró por primera vez en el Protocolo de Kyoto de la ONU en 1997.

[43] Véase G. Chichilnisky and G. M. Heal, OECD, Paris, Economic Division Report *Markets for Tradable CO2 Emission Quotas, Principles and Practice* OECD Economics Department Working Paper No 153, 1999, G. Chichilnisky and G. M. Heal *Global Environmental Risks* Journal of Economic Perspectives, Fall 1993, Special Issue on the Environment, pp. 65-86. G. Chichilnisky: *Key Note Presentation at OECD Conference The Economics of Climate Change*, OECD, Paris, June 14-16 1993, published with G. M. Heal in *The Economics of Climate Change*, (ed. T. Jones) OECD, Paris pp. 159-170.

No obstante, el mercado de carbono fue muy activo y promete reducir las emisiones de carbono. La siguiente sección brinda información para evaluar el desempeño del mercado de carbono a la fecha. Un mercado similar para el dióxido de azufre se estableció en EEUU y se considera muy exitoso para controlar las emisiones de SO₂ dentro de EEUU aunque no tiene las mismas características del mercado de carbono porque trata a todos los participantes por igual. Todas las señales indican que, pronto, EEUU puede adoptar un “enfoque de cota e intercambio” para las emisiones de carbono dentro del mismo territorio estadounidense por cuanto se avanzaron sobre varios enfoques al día de hoy⁴³ si bien no acata en la actualidad al Protocolo de Kyoto que suscribió en 1997. El Protocolo en sí mismo está en un período de transición por cuanto las obligaciones gubernamentales de restringir emisiones expiran en 2012 y nuevas reglas de seguimiento se negocian en la actualidad.

[43] Véase World Bank *State and Trends of the Carbon Market 2007*.

A continuación brindamos estadísticas básicas y resumimos cómo opera el mercado de carbono, quiénes son los compradores y vendedores, qué comercian y qué se logró hasta el momento en materia de reducciones de emisiones. En 2006 el mercado del carbono aumentó en términos de valores estimados 30 mil millones de dólares, tres veces más que el año anterior.⁴⁴ El mercado estuvo dominado por la venta y reventa de European Union Allowances (EUAs) por un valor de casi 25 mil millones bajo el EU ETS (Esquema de Intercambios de Emisiones Europeo). Actividades basadas en proyectos principalmente a través del Mecanismo para el Desarrollo Limpio (Clean Development Mechanism, CDM) del Protocolo de Kyoto y proyectos de implementación conjunta (Joint Implementation, JI) también aumentaron aceleradamente a un valor de cerca de 15 mil millones de dólares durante 2006. Los principios tras los proyectos de CDM y JI se explican en los *Recuadros 2 y 3*. El mercado de reducciones voluntarias de empresas e individuos es mucho menor, no obstante haber aumentado su estimación en 100 millones de dólares en 2006. El Chicago Climate Exchange (CCX) y el New South Wales Market (NSW) alcanzaron volúmenes y valores récord en 2006.

[44] Más estadísticas sobre el mercado de carbono se encuentran en *State and Trends of the Carbon Market 2007*, The World Bank, Washington D.C., May 2007, op. cit.

Otra pregunta planteada frecuentemente es *¿quiénes son los compradores de los mercados de carbono?* Los principales compradores de rigor en el mercado del carbono son:

1. Compradores particulares europeos interesados en EU ETS.
2. Compradores públicos interesados en cumplimentar el Protocolo de Kyoto.
3. Empresas japonesas con compromisos voluntarios en virtud de *Keidanren Voluntary Action Plan* (Plan de acción voluntaria Keidaren)
4. Multinacionales de EEUU operando en Japón y Europa y preparándose por adelantado para la iniciativa regional del gas de invernadero *Regional Greenhouse Gas Initiative* (RGGI) en los estados del NE de EEUU o la *California Assembly Bill 32* que establece una cota de alcance estadual sobre emisiones
5. Minoristas de energía y grandes consumidores regulados por el mercado de New South Wales (NSW) en Australia.
6. Compañías norteamericanas con objetivos de cumplimiento voluntario y vinculante en el Chicago Climate Exchange (CCX) .

Otra pregunta planteada frecuentemente es *¿Quién domina los mercados de carbono?* En 2006 los compradores europeos dominaban los mercados primarios CDM y JI con 86% de participación del mercado (vs. 50% en 2005) y las compras japonesas sólo alcanzaban 7% del mercado primario. El Reino Unido lideraba el mercado con cerca de 50% de los volúmenes basados en proyectos, seguido por Italia con 10%. Compradores del sector privado, predominantemente bancos y fondos de carbono, siguieron comprando grandes cantidades de activos CDM, mientras compradores del sector público continuaron dominando las compras JI.

[45] En 2006 la Comisión de la UE proclamó la Fase I como de aprendizaje y prometió evaluar los planes del segundo período (Fase II) de manera de "asegurar la aplicación correcta y consistente de los criterios y suficiente escasez de asignaciones EU ETS".

El EU ETS (Fase I) demostró que *la señal de precio del carbono* en Europa logró incentivar reducciones de emisiones dentro de la misma y especialmente en los países en desarrollo. Después de la difusión de los datos definitivos sobre emisiones de 2005, resultó claro que la cota de emisiones 2005-6 no se fijó en el valor adecuado visto las emisiones efectivas del período, de manera que los precios cayeron rápidamente durante 2006,⁴⁵ pero en la segunda parte de 2006, el mercado trasladó su atención a la Fase II basada sobre las expectativas de que las cotas serían mucho más exigentes para asegurar precios más altos y más estables. En la próxima sección explicamos este fenómeno desde el punto de vista teórico.

Desde el punto de vista físico, es importante hacer el seguimiento de las reducciones de carbono alcanzadas por su mercado. A diferencia del mercado altamente volátil de EUA 2006, los activos basados en proyectos mostraron una gran estabilidad de precios, mientras los volúmenes transados también crecieron a tasas estables y los países en desarrollo ofrecían casi 450 MtCO₂e de créditos primarios de CDM para un valor total de mercado de 5 mil millones de dólares. Los precios medios para certificados de reducciones de emisiones (CERs) de países en desarrollo en 2006 aumentaron en el margen a 10,90 dólares con una amplia mayoría de transacciones en el rango de 8 a 14 dólares. China siguió con una participación de mercado dominante en el CDM con 61% y fijo un piso de precios relativamente estable para la oferta global de CERs.

Para resumir, desde 2002 se acumularon 920 MtCO₂e –equivalentes a 20% de las emisiones de la UE en 2004– que fueron transadas a través de transacciones primarias CDM por un valor de 8 mil millones de dólares.

7. ¿Cómo fija el mercado los precios del carbono y qué controla la estabilidad?

La sección anterior demostró cómo se logró un mercado que funcionara en 2006 partiendo de una única construcción teórica en el Protocolo de Kyoto de 1997. Un mercado del carbono que transa más de 30 mil millones de dólares, que logró reducir emisiones de carbono y transferir cerca de 9 mil millones de dólares a los países en desarrollo para proyectos CDM de reducción de carbono.

A pesar del éxito de la estrategia de mercado, la estabilidad del mercado de carbono analizado en la sección anterior sigue preocupando a la industria privada, por cuanto busca objetivos firmes para planificar costos y oportunidades en los años venideros. Los legos confunden comprensiblemente cómo se fijan los precios en el mercado y creen que se fijan por las fuerzas de oferta y demanda de los comerciantes que actúan libremente. En realidad, los precios fluctúan en el corto plazo según las fuerzas de la oferta y la demanda, como se demostró en la sección anterior de 2006, pero es posible identificar valores fundamentales del mercado que determinen precios del carbono -y no tienen nada que ver con las fuerzas de la oferta y demanda de corto plazo de parte de los comerciantes. Como se analizó en la sección anterior, la caída de precios durante 2006 se debió a bajas cotas de emisión, como reconocimos en una declaración de la Comisión de la Unión Europea. Esta sección explicará cómo funciona el mercado de carbono para determinar su precio, y cómo estos precios fluctúan en el tiempo. Mostraremos que en una economía dominada por el combustible fósil, hay dos valores fundamentales que determinan los precios en el mercado de carbono: (1) las cotas de emisión, que

miden la escasez y el alcance de la demanda de *permisos* para *emitir*, y (2) la eficiencia de la tecnología en transformar combustibles fósiles en bienes y servicios, que es el equivalente al costo de supresión. Esta sección termina con una explicación de cómo el mercado de carbono evolucionará si se adopta la tecnología termostática global, y una visión general en la transformación del mercado que ocurre desde la economía de combustibles fósil hasta la era solar.

Las variables fundamentales del mercado de carbono y el funcionamiento del mercado en sí mismo se explican en el *Anexo 1* de este trabajo. La tecnología es crucial para la determinación de precios de carbono, por lo tanto se espera que un cambio tecnológico, como se propone aquí, tendrá un gran impacto sobre el precio del carbono.

8. La transición del corto plazo al largo plazo: de la economía del combustible fósil a la energía solar

Puede ilustrarse gráficamente cómo una nueva tecnología impacta la *frontera de transformación* entre bienes y supresión, y los cambios que ocurren en el mercado de carbono cuando se adopta la tecnología termostática global.

La adopción de la termostática global (TG) lleva a la *figura 3* a continuación, que reemplaza a la *figura 3 del Anexo* cuya validez se limita a las economías de combustible fósiles. Cada adopción de termostática global lleva a una nueva curva, tal como ilustra la *figura 3*. Debido a que la termostática global puede generar energía y al mismo tiempo disminuir el dióxido de carbono en la atmósfera, la nueva curva muestra niveles de supresión cada vez mayores correspondientes con el mismo nivel de producción de bienes. Además, debido a que cada planta aumenta la energía eléctrica disponible, la curva de la producción factible de bienes X también se desplaza a la derecha.

Puede ilustrarse y comparar el efecto de construir una planta de carbón estándar y una planta termostática global. Cada planta de carbón aumenta la energía y por lo tanto el producto, pero disminuye la supresión de carbono, (véase la *figura 4*). Si la nueva planta de carbón tiene capacidades de *carbón limpio*, es decir, captura y almacena el carbono que emite, entonces la situación es tal como se presenta en la *figura 5*, a saber, construida la nueva planta el nivel de supresión de carbono permanece invariante, pero el producto total disminuye en alguna medida respecto de lo que sería posible debido al costo adicional del dióxido de carbono capturado y almacenado (CAC o captura y almacenaje de carbono). Para resumir: las plantas de carbón limpio constituyen una mejoría respecto de plantas de carbón estándar porque permiten más energía y producto sin aumentar las emisiones de carbono. Sin embargo, ambas son inferiores a la solución termostática global porque ésta simultáneamente puede aumentar el producto y reducir la concentración de carbono de la atmósfera y de otras fuentes, además de la emisión propia de la nueva planta.

Falta comentar el posible efecto de una estrategia termostática global sobre los mercados de carbono. La *figura 6* ilustra esta situación. Si las cotas sobre emisiones se reducen a niveles más adecuados y como la Unión Europea indicó que seguirá haciendo, entonces el precio del carbono puede permanecer constante durante una parte del proceso. Sin embargo, en algún momento, a medida que más infraestructura se base en energía renovable, se necesitarán menos cotas a las emisiones y por lo tanto el precio del carbono disminuirá y en algún momento en la economía renovable el precio del carbono será, por supuesto, cero.

En la *figura 6* vemos que el proceso de transformación continúa hasta que todas las instalaciones de combustibles fósiles se reemplazan por fuentes de energía alternativa que son neutrales al carbono. En esta situación ya no hay compensaciones entre más bienes y un mejor medio ambiente. El monto total de los bienes se determinará como en la *figura 2 del Anexo*, en términos del monto de energía disponible. En la economía solar es simplemente una cuestión de capital por cuanto la materia prima es gratis. Ya no hay compensación con la supresión del carbono y la amenaza del cambio climático se neutralizó.

Una última observación que emerge de estos diagramas es que el elemento limitante en la producción y el consumo en la economía solar es el capital, por ejemplo la capacidad para construir plantas solares que son muy costosas como descubrimos en el *cuadro 1*. La energía solar es muy abundante y renovable, se ha dicho que brinda el equivalente de un pie de petróleo bañando el planeta todos los días. Aunque no sea infinito, es tan abundante y su distribución tan democrática sobre la superficie terrena que la energía solar podría brindar un proceso rápido sin dañar la atmósfera del planeta. Existen, por supuesto, otros límites medioambientales. Pero el cambio climático podría mantenerse bajo control mediante el termostato global en el corto y largo plazo.

Figura 3

Cada nueva planta TG cambia la curva de transformación entre bienes y supresión de carbono brindando más energía y aumentando la supresión de carbono.

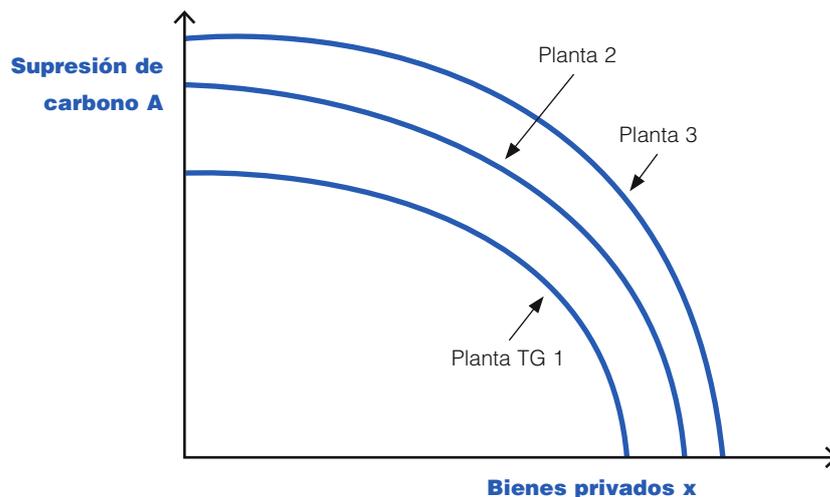


Figura 4

Se construye una nueva planta de carbón estándar. Aumenta la cantidad de energía y productos pero reduce la supresión de carbono.

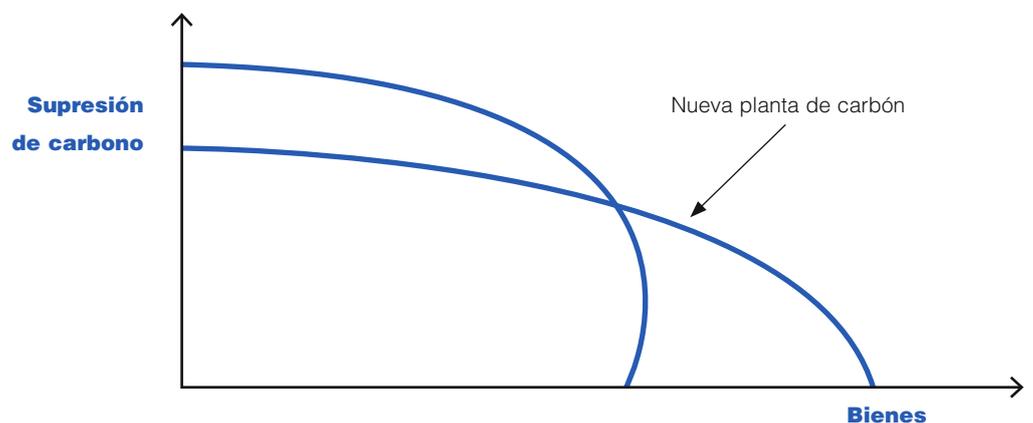


Figura 5

Una nueva planta de *carbón limpio*.

Aumenta el suministro de energía –algo menos que la TG– pero mantiene la supresión del carbono.

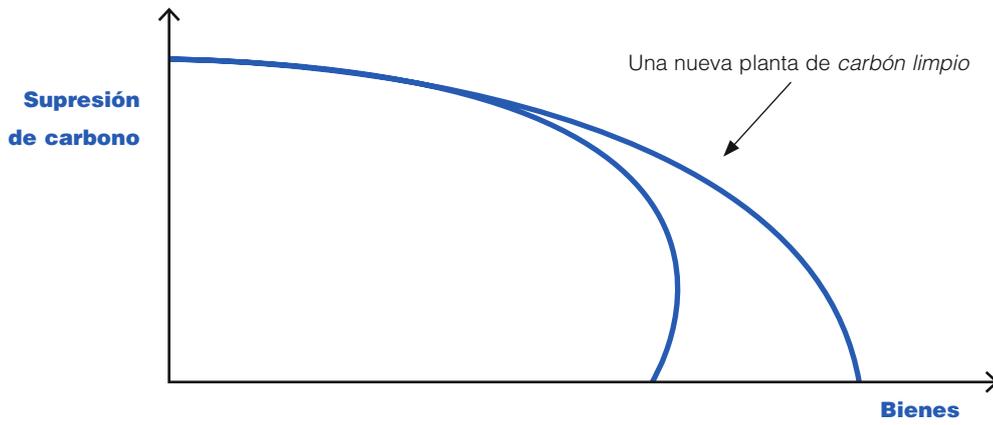


Figura 6

Los precios del carbón disminuyen a medida que los combustibles fósiles se reemplazan gradualmente por fuentes renovables

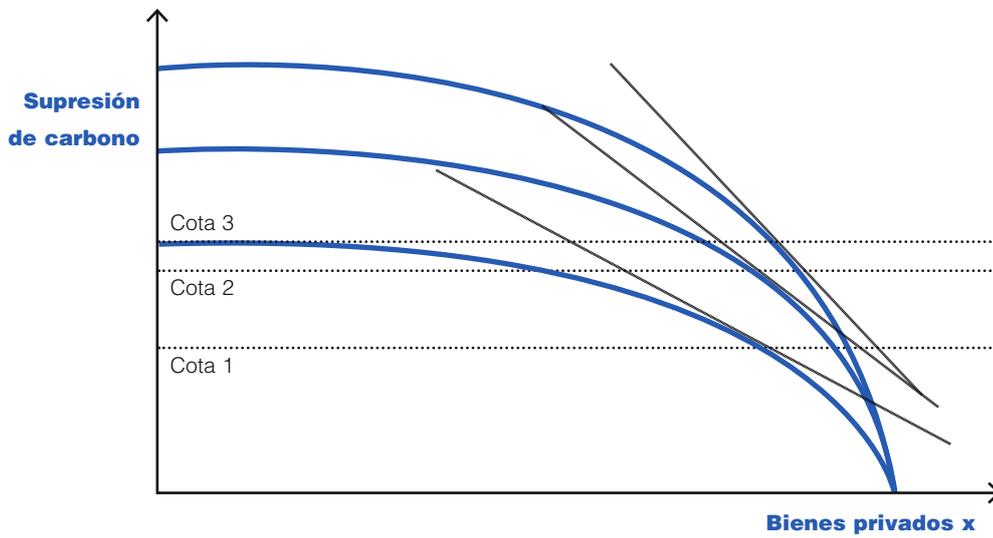
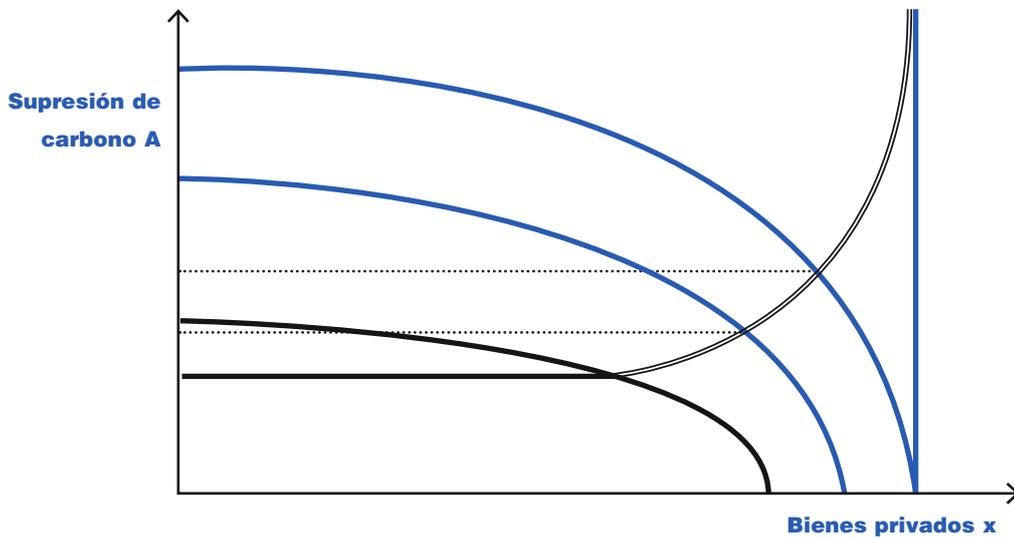


Figura 7

Transición del combustible fósil a la energía solar



La *figura 7* muestra cómo disminuye la compensación inicial entre bienes y un medio ambiente mejor y finalmente desaparece en la era solar. A medida que se instalan plantas del termostato global y se reducen las cotas sobre emisiones, la curva de *transformación* de pendiente negativa del *corto plazo* identificada con un trazo grueso (como lo señalan las curvas de transformación azules) y la curva actual que se observa en el largo plazo, vinculando los bienes producidos y la supresión de carbono realizada, en cambio tiene una pendiente positiva: es la curva ascendente de varios trazos. En el muy largo plazo, la misma converge suavemente en la línea vertical azul que indica el monto total de bienes producidos por la economía, una cantidad que no depende ni disminuye con la supresión de emisiones de carbono.

9. Países en desarrollo: el carbono evitado y el carbono reducido

Los países en desarrollo aumentan masivamente su utilización de energía y se espera que dentro de veinte a treinta años se conviertan en los emisores de carbono más grandes del mundo. Ciertamente, como ya se señaló, China construye una nueva planta de carbón por semana. No hay política pública que pueda reducir el riesgo de calentamiento global en el largo plazo sin encontrar una manera de controlar y reducir las emisiones de China.

La mayor parte de la energía generada este siglo vendrá de plantas de energía recién construidas, porque se espera que la energía utilizada aumente entre cinco y diez veces en lo que queda del siglo. Por lo tanto es importante apreciar la diferencia entre tres estrategias energéticas diferentes sustentadas en plantas de carbón convencionales, plantas de *carbón limpio* y plantas de termostato global.

Las figuras anteriores ilustran la diferencia entre construir una nueva planta de carbón estándar, una planta de *carbón limpio* y una planta de termostato global. Las plantas de carbón estándar aumentan la energía y la producción a expensas de la calidad del medio ambiente, aumentando los riesgos del cambio climático. Las plantas de *carbón limpio* mantienen un nivel similar de supresión de carbono pero aumenta la energía y la producción de bienes (aunque un poco menos). Estabilizan las emisiones por cuanto limpian sus propias emisiones, pero las emisiones de otras fuentes siguen aumentando, alterando así la atmósfera a medida que aumenta la concentración de carbono y llevando a aumentar los riesgos del cambio climático. La estrategia propuesta en este artículo es introducir en su lugar plantas de termostato global, que tienen la capacidad de aumentar la energía y producción de bienes sin emisiones de carbono y al mismo tiempo disminuyen la concentración atmosférica de dióxido de carbono de otras fuentes - reduciendo así el riesgo global del cambio climático.

El mercado de carbono del Protocolo de Kyoto asegura que la reducción de concentraciones de carbono brinda más compensación financiera para los países en desarrollo (a través de CDM) que simplemente estabilizando emisiones. En particular las plantas de termostato global conseguirían crédito por el carbono evitado por utilizar una fuente neutral al carbono para producir electricidad y por la reducción en dióxido de carbono de otras fuentes que brindan por la captura del aire y almacenaje. Así el CDM puede ser una herramienta poderosa para financiar plantas termostáticas globales en países en desarrollo. Esto a su vez puede proveer a los países en desarrollo en el largo plazo de infraestructura de energía limpia, y en el corto plazo puede brindar transferencia de tecnología y una fuente de energía abundante y limpia para el crecimiento de sus economías.

10. Conclusiones

Utilizando fuentes neutras al carbono de energía térmica pueden generarse conjuntamente electricidad y la captura en el aire de dióxido de carbono y su almacenamiento. Esto brinda más energía y disminuye la concentración de carbono en la atmósfera. Fomenta la seguridad energética y el desarrollo económico mientras previene el cambio climático. En el largo plazo, el proceso acelera la transición hacia fuentes alternativas y es compatible con el desarrollo sostenido. Examinamos las estrategias para utilizar esta capacidad en el contexto del mercado de carbono creado por el Protocolo de Kyoto, y las implicancias para las naciones industriales y en desarrollo de una transición de combustibles fósiles a una economía solar. La estrategia de termostato global propuesto en este trabajo es al día de hoy la solución más eficiente de las examinadas, brindando una transición más segura y más veloz hacia un futuro renovable.

Los mercados de carbono tienen un rol importante. El mercado de carbono es crítico para adoptar las tecnologías de reducción de carbono que se sugieren en este trabajo, en términos comerciales. La captura y almacenaje de carbono suman costos a las plantas generadoras de electricidad. Por lo tanto se necesita un mercado de carbono funcionando con cotas para emisiones de carbono cada vez más bajas para brindar precios del mercado de carbono realistas que pueden brindar un ingreso a los inversores en estas plantas y justificar su construcción en términos comerciales.

Recuadro 1. El Termostato Global

La expresión Termostato Global se utiliza para describir una tecnología que tiene la inusual capacidad de aumentar el suministro de energía y a la vez reducir la concentración de carbono en la atmósfera. La tecnología denominada Pantalla Parabólica de Energía Solar Concentrada, también indicada como PP ESC, e instalada en plantas de energía que utilizan *energía solar térmica* como fuente de electricidad, utilizan equipos denominados *pantallas parabólicas* que concentran el calor generado por el sol y lo focalizan en un material absorbente como sales tratadas. El calor se utiliza para girar las turbinas que generan electricidad. La energía residual utilizada en este proceso –también denominada *calor del proceso*– luego se utiliza por el Termostato Global para operar las instalaciones de captura de carbono que extraen el carbono del aire y almacenan el dióxido de carbono en la tierra dentro de cavidades especiales, o para elaborar materia sólida como piedra caliza para la construcción de vivienda o limo para fertilizantes. Por cada kwh de electricidad producida, esta tecnología puede capturar y almacenar más de 2,2 kg de carbono. Cuanta más electricidad genera el Termostato Global, más carbono extrae. El Termostato Global puede utilizar otras formas de *calor del proceso* para extraer carbono del aire, calor producido por otras fuentes de energía renovable como la hidroeléctrica, eólica, nuclear y geotermal. También puede utilizar calor del proceso de fuentes de combustible fósil que se utilizan para producir electricidad como carbón, petróleo y gas, aunque la mayoría de los beneficios proviene de plantas de energía renovable (en el caso de las plantas de combustible fósil, la extracción de carbono tiene doble tarea, a saber, reducir no solo el carbono producido por la planta sino también el carbono ya existente en la atmósfera). El Termostato Global puede reducir la concentración de carbono en la atmósfera a la tasa deseada y por lo tanto en principio puede controlar la temperatura media global, lo cual explica su nombre. Si bien la tecnología del Termostato Global es nueva, se basa en tecnologías probadas que brindan (i) fuentes solares térmicas de electricidad, (ii) captura de dióxido de carbono en el aire, y (iii) el almacenaje del carbono bajo tierra o sobre materiales sólidos, los cuales se conocen todos y se describen en la literatura.⁴⁶

[46] P. Eisenberger and G. Chichilnisky 2007 op. cit, Eisenberger and Chichilnisky poseen la patente del Termostato Global. Klaus S Lackner et al., *The Case for Carbon Dioxide Extraction from the Air Source* Book 57 (9): p6-10. Klaus S. Lackner et al., *Carbon Disposal in Carbonate Materials*, Energy 20,1153-1170(1995). Reference 6 in Kydes Report, EIA/DOE-0607(99). Franz Trieb et al., *A Renewable Energy and Development Partnership EU-ME-NA for Large Scale Solar Thermal Power & Desalination in the Middle East and North Africa*, [http://www.trecumena.org.documents/sanaa paper and annex 2004 04 15.pdf](http://www.trecumena.org.documents/sanaa%20paper%20and%20annex%2004%2004%2015.pdf). Joshua Stolaroff et al., *A pilot-scale prototype contactor for CO2 capture from ambient air: cost and energy requirements*, <http://www.ucalgary.ca/~keith/papers/84.Stolaroff.AirCaptureGHGT-8.p.pdf> McMahan L. Gray, Amine Rich *Solid Sorbents for Carbon Dioxide Capture*, Patent 6547854, 04/15/ 2003. David W. Keith et al., *Climate Strategy with CO2 Capture From Air*, Climate Change (2005), DOI:10.1007/s10584-005-9026-x. W.K. O'Connor et al., *Carbon Dioxide Sequestration by Direct Mineral Carbonation* First National Conference on Carbon Sequestration, Washington DC, May (2001). David L. McCollum et al., *Techno-Economic Models for Carbon Dioxide Compression, Transport, and Storage*, Institute of Transportation Studies, University of California Davis, UCD-ITS-RR-06-14. P.S. Newall et al *CO2 Storage as Carbonate Materials*, IEA Greenhouse Gas Program Report IEA/PH3/17, February (2000). T.M. L. Wigley, in *The Carbon Cycle*, T.M.L. Wigley and D.S. Schimel, Eds., Cambridge University Press, 2000) pp 258-276.

Recuadro 2. Mecanismo para el desarrollo limpio - Clean Development Mechanism (CDM)

El Protocolo de Kyoto de las Naciones Unidas fue suscrito por 166 países en 1997, EEUU entre ellos, y fue ratificado en 2005. Incluye un cuadro que estipula límites para cada país industrializado (a saber, los países de la OCDE) de la cantidad permitida de emisiones de dióxido de carbono y otros gases de invernadero. Los países en desarrollo no tienen límites para la emisión de gases. De acuerdo con la Convención para el Clima de las Naciones Unidas de 1992, las naciones en desarrollo no están obligadas a reducir las emisiones de gases salvo que reciban una compensación por hacerlo. La justificación proviene del hecho que, tanto en la actualidad como históricamente, alrededor de 70% de las emisiones globales se originan en los países de la OCDE donde vive alrededor de 20% de la población mundial. El Protocolo de Kyoto brinda tres *mecanismos de flexibilización* para implementar los límites de emisión globales. El primero es el *mercado de carbono*, por el cual países de la OCDE pueden transar libremente entre ellos sus derechos de emisión de gases, con tal que en conjunto permanezcan dentro de los límites globales. El segundo *mecanismo de flexibilización* comprende las naciones industriales y las en vías de desarrollo. Estipula que créditos de carbono se asignarán a inversores en las naciones industrializadas que inviertan en el territorio de los países en desarrollo en proyectos de tecnología *limpia* que pueden ser comprobados (en los términos de la Convención del Clima de la ONU) que reducen las emisiones de carbono por debajo de la línea nacional convenida. Los *créditos de carbono* pueden utilizarse para reducir las obligaciones de las naciones industriales de emitir, aunque las reducciones actuales de las emisiones ocurren en el territorio de las naciones desarrolladas. Estos créditos pueden intercambiarse en el mercado de carbono a los precios establecidos por los derechos de carbono intercambiados entre los países de la OCDE. En 2006, 30 mil millones de dólares se transaron en el mercado de carbono y proyectos CDM por un total de 8 mil millones de dólares se iniciaron en las naciones en desarrollo, equivaliendo a alrededor de 20% de las emisiones de carbono de la UE.⁴⁷

[47] Véase Chichilnisky and Heal *Environmental Markets: Equity and Efficiency* Columbia University Press, 2000, que contiene el Protocolo de Kyoto y un registro detallado de la negociación y explicación de sus provisiones entre ellas el mecanismo de desarrollo limpio.

Recuadro 3. Implementación Conjunta - Joint Implementation (JI)

Un tercer mecanismo de *flexibilización* autorizado por el Protocolo de Kyoto, consiste en proyectos conjuntos iniciados en países industrializados y en desarrollo con el propósito de reducir emisiones globales y se denomina Implementación Conjunta –*Joint Implementation*– porque se implementa conjuntamente en el territorio de los países industrializados y en vías de desarrollo. Este mecanismo comprende acuerdos bilaterales entre países y por lo tanto es independiente del mercado de carbono, y correspondientemente su alcance es mucho más pequeño que el mercado de carbono o el mecanismo de desarrollo limpio CDM, comprendiendo alrededor de 100 millones de dólares en proyectos desde 2006.⁴⁸

[48] Véase World Bank Report *State and Trends of the Carbon Market 2007* op. cit.

Anexo 1

Este anexo brinda un breve resumen de la teoría existente detrás del mercado de carbono global e incluye una serie de diagramas a modo de ilustración (las figuras a continuación). El cuerpo de la teoría detrás del mercado de carbono fue desarrollado por uno de los autores cuando propuso la creación del sistema de *cota e intercambio* del Protocolo de Kyoto a la comunidad internacional en 1995 y 1996, mientras se presentó en varias reuniones de la OCDE, del Banco Mundial y la Convención Marco del Cambio Climático de las Naciones Unidas y en la redacción misma del Protocolo en Kyoto en diciembre de 1997. Los resultados a continuación indican que aunque los mercados de carbono operan de alguna manera similar a los mercados estándares, en otros son absolutamente diferentes y se comportan de manera diferente a otros mercados.⁴⁹

Los antecedentes son los siguientes. En la economía actual, la energía de combustible fósil se utiliza para producir la mayoría de los bienes y servicios según la representación en la *figura 2* del cuerpo principal. Sabemos que alrededor de 90% de toda la energía utilizada en el mundo de hoy proviene de fuentes fósiles, de manera que para simplificar el análisis supongamos que toda la energía proviene de los mismos. Debido a las características físicas de los combustibles fósiles, utilizar más combustible fósil emite más dióxido de carbono. Podemos escribir estas relaciones simplemente como sigue:

$$X = F(E)$$

denota la transformación de energía E en bienes, X , y se ilustra en la *figura 1* a continuación, y

$$X = \psi(S), \quad d\psi / dS < 0$$

denota la transformación entre bienes y supresión de carbono S , cuya pendiente es negativa, como se ilustra en la *figura 2* más abajo. Al medir la energía y la supresión adecuadamente, podemos escribir,

$$E = -S$$

lo cual significa que cuanto más energía se utiliza, más carbono se emite y menor es la supresión de carbono S , un hecho que es propio de la economía del combustible fósil. Es importante comprender que la calidad de la atmósfera, medida por ejemplo por la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera en partes por millón, también puede considerarse *buena o mala* según cómo se mida. Ciertamente, menores concentraciones de CO_2 se asocian con un régimen climático más estable, mientras que concentraciones más altas de CO_2 aumentan la temperatura media y crean turbulencias atmosféricas, suben el nivel del mar y aumentan el riesgo de cambios climáticos catastróficos. El *bien* en cuestión también puede describirse como la *supresión* del dióxido de carbono, a saber una disminución de las emisiones de carbono a partir de la base de hoy de alrededor de 400 ppm. La supresión del carbono puede considerarse buena porque mejora nuestro bienestar.

La supresión del carbono de hecho es un *bien público* debido a las características físicas del dióxido de carbono, que se difunde uniforme y establemente por la atmósfera del planeta. Se considera un *bien público* porque todos en el planeta se enfrentan con la misma concentración de CO_2 , sin opción. Los bienes privados son aquellos en los cuales tenemos la posibilidad de elegir consumir independientemente el uno del otro, por ejemplo, podemos elegir consumir cierta cantidad de bananas, pan y autos independientemente el uno del otro. Que la calidad de la atmósfera sea un *bien público* no es una afirmación económica ni política, es una realidad física. Yo puedo consumir teóricamente una banana mientras Ud. elige consumir dos o ninguna. Pero es físicamente imposible que yo soporte 430 ppm de carbono en la atmósfera y Ud. soporte 280 ppm. Toda la atmósfera tiene una única concentración de carbono, que es igual para todos los países. Esta característica resulta importante en las negociaciones internacionales sobre el clima.

El próximo paso está en la *figura 2* a continuación, que ilustra cómo, en una economía de combustible fósil, cuánto más energía se utiliza, menos supresión de carbono se produce. Esto se traduce en una compensación cruel que sintetiza nuestro dilema ambiental: la elección entre más bienes y un mejor clima. Esto es el por qué en una economía de combustible fósil, la industrialización y el

[49] Algunos de los resultados discutidos más abajo se publicaron en G. Chichilnisky and G. M. Heal *Environmental Markets: Equity and Efficiency*, Columbia University Press, 2002, G. Chichilnisky and G. Heal *Who Should Abate Carbon Emissions: An International Perspective* Economic Letters, Spring 1994, pp. 443-449, G. Chichilnisky, *Development and Global Finance: The Case for an International Bank for Environmental Settlements*, UNESCO and UNDP, New York, 1996.

Figura 1

La transformación de energía en bienes y servicios.

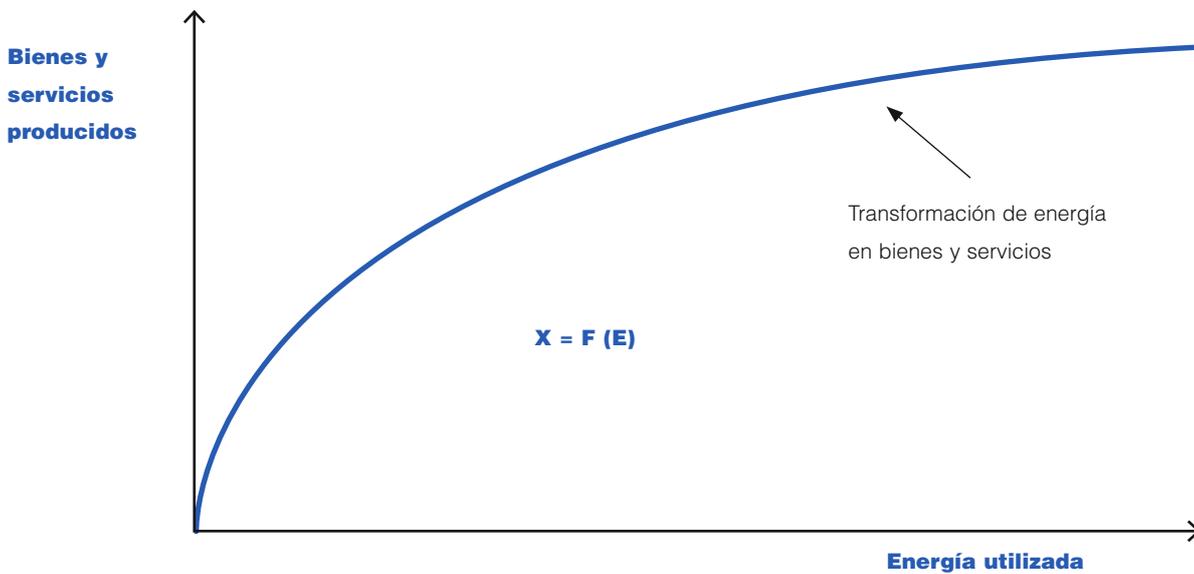
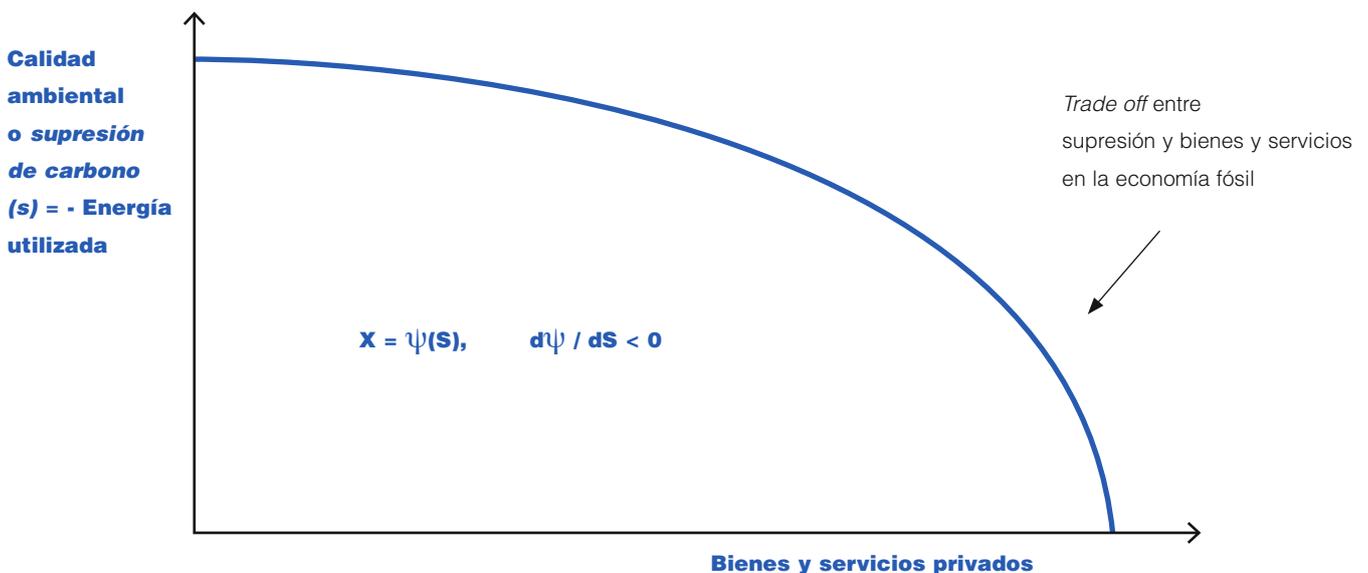


Figura 2

A mayor utilización de energía fósil, mayores emisiones de carbono.



consumismo se ven como los *culpables* del cambio climático. Ciertamente, en una economía fósil, cuantos más bienes producimos menor es nuestra calidad atmosférica.

Podemos graficar cómo funciona el mercado de carbono. La *figura 3* a continuación ilustra una economía mundial de dos países. Cada uno queda representado por un sistema de coordenadas, a la izquierda el país 1 y a la derecha el país 2. El eje horizontal representa los niveles de consumo de bienes y servicios, y el eje vertical representa los niveles de supresión de carbono, el bien público. La frontera de transformación ilustrada para cada país en la *figura 3* es la misma curva de compensación representada en la *figura 2* anterior.

Observe que cada país puede utilizar una tecnología de producción diferente, que se representa en la *figura 2* anterior mediante una curva de transformación convexa. Por lo tanto cada país en la *figura 3* puede tener una curva de transformación o compensación distintas, porque cada uno puede tener una tecnología de producción diferente. Sin embargo debido a que ambos países utilizan combustibles fósiles, como muestra la *figura 2* anterior, cuanto más energía de combustible fósil utilice un país, más carbono emitirá

Figura 3

Dos países con economía de combustible fósil. Cada uno enfrenta un *trade off* tecnológico: producir más bienes y utilizar más energía o emitir menos carbono.

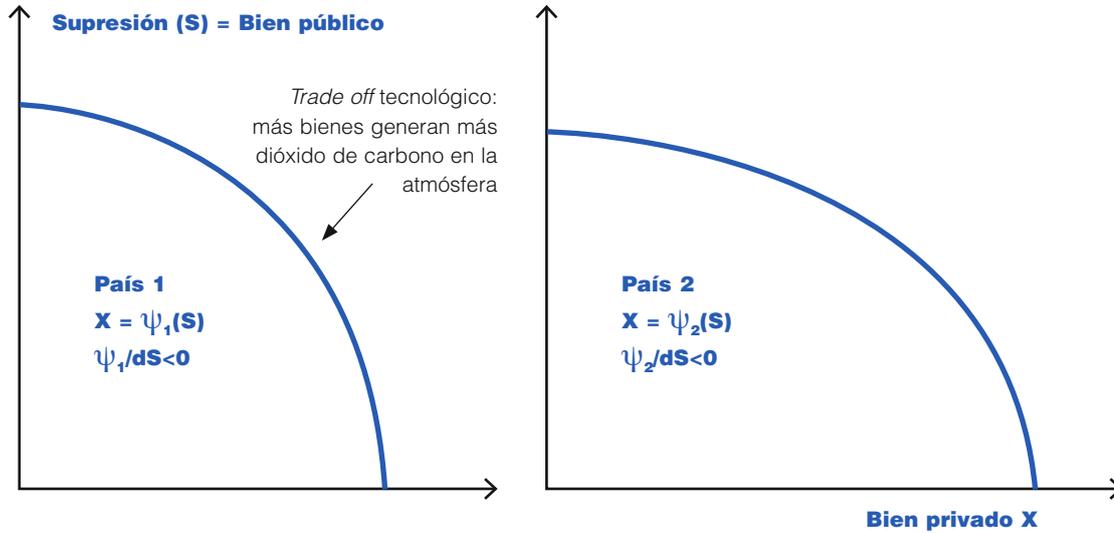
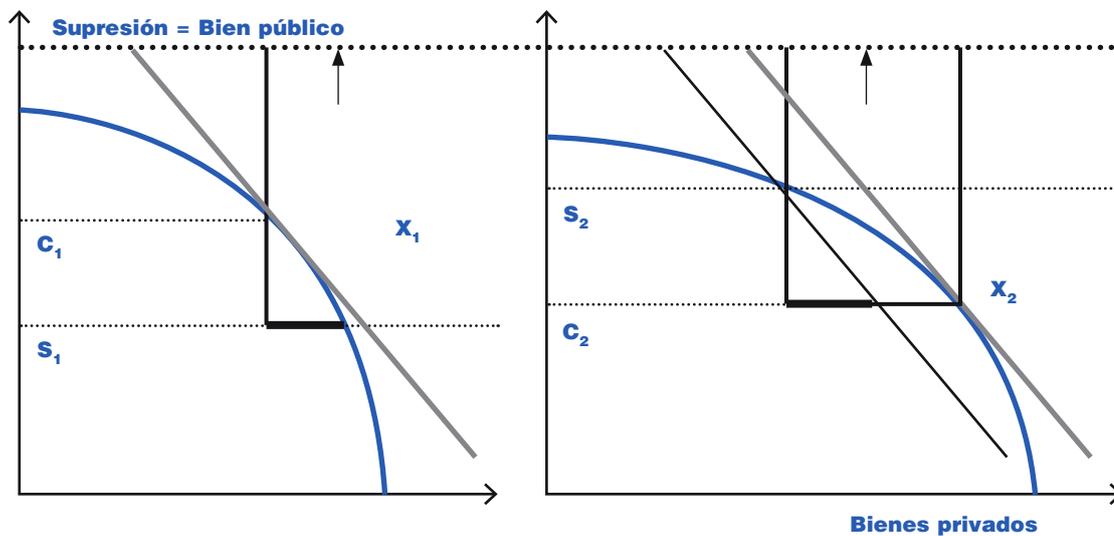


Figura 4

El precio del carbono se representa mediante la línea decreciente de color gris. Tiene la misma pendiente para ambos países por los mercados competitivos. La pendiente indica la “tasa de intercambio” entre el carbono y bienes. Este precio depende solamente de la tecnología y las “cotas” elegidas. El segmento horizontal lleno del país 2 representa el valor que el país 2 paga por importar del país 1 ‘permisos’ para emitir, en términos de los bienes que el país 1 exporta al país 2 a cambio de esos permisos.



y menos supresión generará. Por esta razón en cada uno de los sistemas de coordenadas de la *figura 3*, la curva convexa tiene una pendiente negativa, ilustrando la relación negativa entre los bienes producidos y la supresión de carbono que es típica de economías de combustible fósiles. Para resumir: cuantos más bienes se producen, más energía se utiliza y más carbono se emite en una economía fósil.

Ahora introducimos el mercado de carbono, que se ilustra en la *figura 4*. Para esto suponemos que cada uno de los dos países de la *figura 2* se convirtió en signatario del Protocolo de Kyoto o se comprometió de alguna manera con una obligación de supresión –que anteriormente llamamos *compromiso* o *cota*– para limitar o reducir sus emisiones de carbono. Esto queda indicado por una línea horizontal punteada en la *figura 4* que es distinta para cada nación, por cuanto cada país tiene una cota diferente. La altura de esta línea vertical puede interpretarse como el compromiso de supresión de carbono del país y por lo tanto la altura es su *compromiso* o *cota*. Los niveles A y B en la *figura 4* indican las *cotas* de los países 1 y 2 respectivamente.

El monto total de supresión en el mundo es, desde luego, la suma de lo suprimido por ambos países. El total de carbono suprimido es el mismo para ambos países debido a las propiedades físicas del dióxido de carbono. Por lo tanto existe una línea horizontal punteada común en la *figura 4* que es válida para los dos países, señalando una disminución de las emisiones en el mundo en total, es decir, una *supresión mundial*.

Utilizando la *figura 4*, ahora podemos ilustrar el funcionamiento del sistema de *cota e intercambio* y cómo los precios se determinan por *valores fundamentales* de los mercados. El sistema de cota e intercambio representado aquí podría ser el sistema de comercio o la economía mundial y, solamente para el caso de EEUU, los agentes podrían ser estados, ciudades, o empresas públicas según cómo se construya el sistema. Sin embargo, en este último caso, el monto total suprimido se determinará no solamente por las *cotas* de EEUU sino también por las *cotas* de emisión del resto del mundo. Esto se debe a que, como ya se mencionó, el nivel general del dióxido de carbono en la atmósfera del planeta es igual para todas las personas en el mismo. De hecho es la suma de las emisiones generadas por todos los países del mundo. Esta característica es lo que vincula el bienestar de todo país al dilema del calentamiento global y lo que hace posible que las naciones en desarrollo y las industriales compartan la meta de limitar las emisiones de carbono. Las emisiones de carbono generadas en India suben el nivel del mar en América y aquellas generadas en América suben el nivel de mar en India.

Las ecuaciones que describen el equilibrio del mercado de carbono son las siguientes:

Cada país $i = 1, 2$ optimiza el bienestar en términos de su consumo del bien X y la calidad ambiental S, dentro de sus posibilidades tecnológicas y sujeto a la restricción del ingreso nacional Y:

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{S, X} W_i(X_i, S) \\ & \text{Sujeto a } X_i = \psi(S) + \pi(S - S_i) \end{aligned}$$

Donde π es el precio relativo de los *permisos* de carbono respecto de los bienes X, S_i es la *cota* dada para emisiones o los derechos para emitir de la nación i y el precio de los bienes X se supone igual a un dólar.

Esta ecuación significa que cada nación consumirá una cierta cantidad de bienes X y calidad ambiental S que maximiza el bienestar, dado que produce X utilizando S, y que comercia X y sus permisos para emitir con la otra nación. El equilibrio de mercado significa un precio para los permisos y niveles de producción y consumo para los cuales la oferta es igual a la demanda de manera que ambos mercados se despejen, para bienes y permisos, y cada país maximiza su bienestar dentro de su ingreso.

Que el mercado se despeje significa que el monto total suprimido es igual a la suma de lo suprimido por ambos países, y que el monto de bienes consumidos es igual al producido:

$$C_1 + C_2 = S_1 + S_2$$

y

$$X_1 + X_2 = \psi_1(C_1) + \psi_2(C_2)$$

En la *figura 4* anterior las flechas pequeñas que señalan hacia arriba indican la solución de mercado luego de iniciado el comercio. Cada país produce bienes y supresión de carbono para maximizar su bienestar dentro de su ingreso, donde el ingreso nacional se mide tomando en cuenta los precios de los bienes y servicios y de los permisos de carbono. El precio en la *figura 4* se da por la pendiente de la línea de color azul. El equilibrio de mercado ocurre cuando *la oferta es igual a la demanda*. Aquí la oferta incluye no solamente bienes y servicios sino también *permisos* de emisión que se intercambian entre países. Las condiciones de óptimo requieren que cada país produzca en el punto de tangencia entre la línea de precios y la frontera de transformación, de manera que el país 1 produce en X_1 y el país 2 en X_2 , donde los puntos X_1 y X_2 se indican en la *figura 4*. El país 1 en la *figura 4* suprime *más* carbono en su nivel de X_1 de lo requerido (el requerimiento es el punto S_1 , donde el país 1 produce en X_1 , y la altura del punto X_1 que indica su nivel de supresión, a saber C_1 , es más alto que S_1). El país 2, en vez, suprime *menos* de lo requerido (lo requerido es el punto S_2 , que es más alto de C_2 , que es la altura del punto X_2). Por lo tanto un país comprará permisos para emitir gases y el

otro los venderá. De hecho el país 1 será un vendedor neto de permisos de carbono mientras que el país 2 será un comprador neto de permisos, como se demuestra en la *figura 4*. Los dos países producen bienes y fluye un comercio internacional de permisos de carbono entre ellos al igual que de bienes. El país 1 termina utilizando el ingreso adicional de la exportación de permisos para importar más bienes, y su consumo final en equilibrio de mercado es el punto señalado por la flecha. Este país exporta permisos para emitir gases e importa bienes con el ingreso alcanzado de manera que termina consumiendo más bienes de los que produce. Lo opuesto ocurre en el país 2, quien debe comprar permisos del país 1, y tiene que exportar bienes al país 1 para pagar por sus permisos. El país 2 a fin de cuentas consumirá menos bienes de lo producido en el equilibrio de mercado señalado por la flecha. La oferta de permisos debe igualar la demanda de permisos, y esto ocurre cuando el monto de permisos que vende el país 1 es igual al monto de permisos que el país 2 quiere comprar. El precio del mercado de carbono se ajusta hasta que la oferta se iguala a la demanda tanto en el mercado de bienes como en el mercado de permisos. En un mercado competitivo, sin embargo, este precio depende de dos parámetros importantes que llamamos *valores fundamentales* del mercado: (1) la transformación tecnológica entre más bienes y más supresión de carbono, y (2) el nivel de *supresión* o *cotas* que son suministrados externamente por los gobiernos. Cuanto más bajas las cotas, mayor es la obligación de suprimir emisiones de gases y por lo tanto más alto es el precio del carbono. Así opera el mercado. Observe que es exactamente como lo indicó la Comisión de la UE en 2006, cuando descubrieron que los precios del carbono bajaban porque las cotas sobre emisiones de carbono eran demasiado bajas y prometieron ajustar las cotas adecuadamente (ver la sección previa). Al fijar las cotas, los gobiernos determinan la demanda de permisos e inciden en el alza o baja del precio del carbono.

Además, es importante apreciar que la tecnología o *frontera de transformación* juega un rol importante. Un resultado fundamental en la teoría de los mercados competitivos asegura que el precio que iguala la oferta y la demanda de bienes debe ser igual a la tasa de transformación tecnológica entre estos bienes, a saber, la pendiente de la curva de transformación en la *figura 4*. Este es un resultado estándar y no necesita mayor análisis. Sin embargo, vale la pena señalar que los resultados fundamentales se cumplen sólo en mercados competitivos puros. Esto significa que todos los comerciantes comparten la misma información y ninguno domina el mercado como en situaciones monopólicas. Bajo estas condiciones, la tecnología que transforma energía en bienes y supresión de carbono, presentada en las figuras 2, 3 y 4, juegan un rol fundamental en determinar el precio del carbono como también las *cotas* generales de mercado determinadas por los gobiernos.