



ESTUDIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA

El costo social del carbono: una visión agregada desde América Latina

José Eduardo Alatorre
Karina Caballero
Jimmy Ferrer
Luis Miguel Galindo



NACIONES UNIDAS

CEPAL



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.



www.cepal.org/es/suscripciones

El costo social del carbono: una visión agregada desde América Latina

José Eduardo Alatorre
Karina Caballero
Jimmy Ferrer
Luis Miguel Galindo



Este documento fue preparado por Karina Caballero, Luis Miguel Galindo, José Eduardo Alatorre y Jimmy Ferrer, de la Unidad de Cambio Climático, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco de las actividades del proyecto “Apoyo a la implementación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe” en su componente “Diseño de políticas públicas de mitigación y adaptación frente al cambio climático”, ejecutado por la CEPAL en conjunto con la Agencia Alemana de Cooperación Internacional (GIZ) y financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ).

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización.

Publicación de las Naciones Unidas
LC/TS.2019/10
Distribución: Limitada
Copyright © Naciones Unidas, 2019
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.18-00462

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Publicaciones y Servicios Web, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Resumen ejecutivo	5
Introducción	9
I. Marco conceptual	11
II. El costo social del carbono: revisión de la literatura	19
III. Síntesis de la literatura o “meta-análisis”	25
IV. Conclusiones y comentarios generales	43
Bibliografía	45
Cuadros	
Cuadro 1 Resumen de las observaciones incluidas en el meta-análisis	28
Cuadro 2 Resultados de meta-análisis: efectos aleatorios	42
Gráficos	
Gráfico 1 Estimaciones del impacto económico mundial del cambio climático	16
Gráfico 2 Estimaciones del impacto del cambio climático en la economía global	17
Gráfico 3 Los impactos del cambio climático en el crecimiento y desarrollo	17
Gráfico 4 Curva costo de abatimiento de GEI a nivel global 2030.....	23
Gráfico 5 Distribución de las observaciones del CSC.....	40
Gráfico 6 Costo Social del Carbono:Distribución por tasa de descuento	41
Recuadros	
Recuadro 1 El Costo social del carbono y la política publica.....	18
Recuadro 2 Impuestos al carbono: evidencia internacional.....	20
Recuadro 3 Curvas de costos de abatimiento (CCA)	22
Recuadro 4 El Costo Social del Carbono (CSS) y la valoración contingente	24

Resumen ejecutivo

El principal objetivo de este estudio es ofrecer una síntesis de los valores del Costo Social del Carbono (CSC) para la construcción de políticas públicas referidas al cambio climático en América Latina.

El cambio climático es una externalidad negativa global donde se emiten a la atmósfera, sin costo económico, las emisiones de gases de efecto invernadero, que derivan en el cambio climático (Stern, 2007). Así, desde la óptica de la teoría económica, atender el desafío del cambio climático requiere instrumentar un conjunto de políticas públicas en donde destacan, por ejemplo, el uso de diversos instrumentos económicos como el impuesto al carbono. La implementación de estas políticas públicas, en forma eficiente, requiere conocer sus costos y beneficios económicos lo que requiere disponer de alguna estimación del costo económico, social y ambiental que ocasiona la externalidad negativa del cambio climático. De este modo, el concepto del costo social del carbono (CSC) es fundamental en la economía del cambio climático. El CSC busca identificar el costo económico que ocasiona una tonelada adicional de CO₂ emitida a la atmósfera sobre las actividades económicas, el bienestar social y los ecosistemas (Stern, 2007, Watkins y Downing, 2008). El CSC se define como el valor monetario del daño causado al emitir una tonelada adicional de carbono en un momento dado del tiempo-

La evidencia reportada sobre el valor del CSC es muy variada y heterogénea y deriva, en la mayoría de los casos, del uso de distintos supuestos y valor de los parámetros en los Modelos de Análisis Integrados (MAI) que analizan, simultáneamente, los fenómenos climáticos, económicos, sociales y ambientales.

Así, las principales diferencias en los supuestos y valores de los parámetros que derivan en valor distintos del CSC se concentran en: a). El uso de distintas tasas de interés de descuento y de pesos específicos por nivel de ingreso per cápita (*equity weights*). b). El uso de diversos métodos y supuestos en la valoración económica. c). Diferentes formas de incorporar el riesgo y la incertidumbre sobre la ocurrencia de eventos climáticos extremos. d). La sensibilidad incorporada en los MAI del clima a los niveles de concentraciones de CO₂ en la atmósfera y el tiempo o el ciclo de vida del carbono.

De este modo, la síntesis de la literatura de los valores del CSC se basó en el uso de diversas técnicas de meta-análisis (Borenstein et al., 2009) en donde se identifica un costo social del carbono de 25.83 dólares por tonelada, con rangos muy estrechos (24.99 a 26.67). Destaca, además, que este valor es sensible a la tasa de descuento utilizada, por ejemplo, el valor del CSC, con tasas de descuento cercanas a cero, es de 100 dólares la tonelada de carbono mientras que, con una tasa de descuento superior al 3%, se obtiene un CSC de 6 dólares por tonelada de carbono. Este valor de 25.83 dólares como CSC está en el espectro bajo-medio de la literatura económica y es probable que aumente en el futuro atendiendo a los

potenciales efectos de retroalimentación entre el clima y los impactos económicos y a la identificación de nuevos efectos negativos del cambio climático tales como un aumento de las migraciones o como consecuencia de potenciales efectos de eventos catastróficos extremos.

Existen además estimaciones colaterales al CSC en donde destacan, por ejemplo, la construcción de Curvas Marginales de Costo de Abatimiento (CMCA) y el uso de impuestos al carbono o de mercados de carbono. En este contexto, destaca el uso creciente de las CMCA para propósitos de política pública, en específico, para los análisis de costo beneficio. Por su parte, los impuestos al carbono se aplican actualmente en una gran diversidad de países. Los rangos de estos impuestos oscilan desde 1 dólar por tonelada en países como México Polonia y Ucrania, hasta 126 dólares en Suecia. Actualmente, existen 20 esquemas de impuestos al carbono a nivel nacional y 2 a nivel región en Canadá (Banco Mundial y Ecofys, 2017). El valor promedio de estos impuestos es de 22.1 dólares por tonelada. Asimismo, destaca que los derechos de emisión de la Unión Europea disminuyeron en los últimos años drásticamente de 28 euros a menos de 5 euros. Sin embargo, es importante considerar que el actual precio del carbono del SCE de la UE no refleja el costo total de las políticas y medidas de mitigación de la UE (ICAP, 2017).

Así, el conjunto de evidencia presentada en este estudio sugiere:

Estos resultados indican un valor potencial del carbono de 25.83 dólares por tonelada de carbono a utilizar en los análisis de costo beneficio o de eficiencia económica e incluso un valor aproximado sobre el valor de un impuesto óptimo. Este valor puede considerarse como conservador ya que es más probable más noticias negativas que positivas en el futuro atendiendo a los procesos de retroalimentación climática y/o a la identificación de procesos socioeconómicos que aún no han sido plenamente analizados como las migraciones.

La relevancia del CSC debe matizarse atendiendo a varios factores:

- El nivel de incertidumbre de estas estimaciones. Esto es, los resultados obtenidos están sujetos a diversas fuentes de incertidumbre que pueden inducir a modificaciones substanciales en los resultados finales. En este sentido, el valor específico del CSC debe tomarse como un valor indicativo sujeto a revisiones periódicas. Por ejemplo, destaca las diferencias en las estimaciones con distintas tasas de descuento que oscilan desde 100 a 6 dólares la tonelada de carbono. En este sentido, es altamente probable que este valor tienda a subir en los próximos años.
- El precio social del carbono que se desprende de la síntesis de la literatura es insuficiente para resolver el desafío del cambio climático¹ (Ackerman, et al, 2011, CEPAL 2015). Esto es, en particular, en los países en desarrollo existe una elasticidad precio de la demanda general de energía y de las gasolinas inelástica que sugiere la escasa presencia de bienes y servicios sustitutos. En este escenario es difícil considerar que el alza de los precios de los combustibles conduzca a la adecuada sustitución de bienes y servicios con alto contenido de carbono. Existen además consideraciones de equidad en los países en desarrollo atendiendo a los potenciales impactos de un CSC en la distribución del ingreso o la competitividad internacional. De este modo, una posible propuesta de política pública puede incluir la conformación de corredores de CSC, con precios diferenciados, que permitan preservar la competitividad regional y minimicen los efectos negativos en el bienestar.
- Actualmente existe una tendencia a utilizar en los análisis de costo beneficio un precio sombra del carbono derivado de los costos marginales de abatimiento en vez de considerar el CSC (Watkins, et al 2006). Ello busca que el valor del carbono esté más cerca de del costo de los procesos de mitigación.

¹ Gerlagh y Liski (2012) argumentan, con un modelo de equilibrio general computable, el precio óptimo del carbono es muy distinto de los costos estimados de la externalidad negativo.

En todo caso, desde la óptica de la política pública, identificar un CSC en el largo plazo ofrece una certidumbre que se convierte en un mecanismo fundamental para la innovación, los procesos de sustitución de bienes y servicios intensivos en carbono y para preservar los niveles de ahorro e inversión futuros² (Stern, 2007, Hoel, 2009 y Gerlagh y Liski, 2013). Así, por ejemplo, un CSC es un mecanismo fundamental para los sectores como la energía, el transporte, los bosques y en general para las políticas públicas referidas al cambio climático (Pearce, 2003). Estos procesos, además, se refuerzan; por ejemplo, las políticas públicas para detener la deforestación o el eliminar los subsidios a los combustibles fósiles reducen los costos de la mitigación substancialmente (Maddison, 1995).

De este modo, identificar y establecer un CSC resulta un instrumento particularmente útil en la construcción de políticas públicas referidas al cambio climático y al desarrollo sostenible. Ello, sin embargo, debe incluir el principio precautorio, el reconocimiento del nivel de incertidumbre asociado, los análisis de sensibilidad respectivos y el uso de análisis complementarios como las Curvas Marginales de Costo de Abatimiento (CMCA).

² Incluyendo el aumento paulatino de costos de extracción para recursos naturales no renovables (Hoel, 2009).

Introducción

El concepto de costo social del carbono (CSC) es uno de los fundamentos de la economía del cambio climático. Este puede considerarse, desde una óptica económica, como una externalidad negativa global (Stern, 2007) consustancial al actual estilo de desarrollo (CEPAL, 2015) Esto es, el conjunto de las actividades económicas emite a la atmosfera emisiones de gases de efecto invernadero, sin costo económico alguno, que ocasionan el cambio climático. La presencia de una externalidad negativa, como el cambio climático, puede entenderse como la consecuencia de fallas de mercado o de la inexistencia de los mercados apropiados (Hanley, 2001 Perman, et al., 2003). De este modo, atender el desafío del cambio climático conlleva la aplicación de diversas políticas públicas tales como regulaciones o instrumentos económicos en donde destaca, por ejemplo, el uso de un impuesto al carbono. Este impuesto tiene su fundamento en los impuestos de tipo Pigou (1920) que buscan que los agentes económicos internalicen la externalidad negativa (Hanley, 2001).

Sin embargo, aplicar en forma económicamente eficiente, un impuesto al carbono requiere identificar los costos económicos que ocasionan las emisiones de gases de efecto invernadero a través del cambio climático. Esto es, se requiere identificar los costos sociales del carbono, para poder establecer el monto óptimo del impuesto al CO₂. Identificar los costos económicos del cambio climático es una tarea compleja, que incluye un alto grado de incertidumbre, atendiendo a la necesidad de realizar diversas proyecciones y simulaciones de distintos escenarios en el futuro y la valoración económica de distintos bienes y servicios. De este modo, se observa que existen una amplia variedad de estudios y resultados sobre el CSC que es necesario analizar para identificar sus patrones regulares y acotar para reducir el margen de incertidumbre para propósitos de política pública.

Así, el objetivo principal de este artículo es presentar una síntesis de la literatura del CSC para propósitos de política pública. Los resultados de este trabajo presentan desde luego, un elevado nivel de incertidumbre.

Este estudio incluye cuatro secciones, además de la introducción, la primera presenta la metodología de los modelos de análisis integrados, que son la principal forma en la que se estima el costo social del carbono y en donde se incluyen también los grandes temas de debate metodológico como la tasa de descuento, la incertidumbre y los pesos por equidad. Las estimaciones de la literatura del costo social del carbono se presentan en el apartado II. En la III sección, se muestran los resultados del meta-análisis del costo social del carbono. Finalmente, se presentan conclusiones y comentarios generales.

I. Marco conceptual

El cambio climático, consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero, tiene efectos negativos significativos sobre las actividades económicas, el bienestar social y los ecosistemas (Stern, 2007, IPCC, 2007). El cambio climático puede entenderse, desde una óptica económica, como una externalidad negativa global que requiere por tanto la aplicación de diversas políticas públicas para solucionarlo y en donde destacan el uso de impuestos al carbono. La instrumentación de estos impuestos al carbono, en específico, un impuesto a la tonelada de carbono, desde una óptica de impuesto ambiental o Pigou, requiere estimar los daños monetarios que ocasiona una tonelada de carbono que se conocen como el costo social del carbono³.

Así, el CSC⁴ se puede definir⁵ como el costo social, con un horizonte normalmente de 100 años, de un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que requiere identificar los costos económicos monetarios marginales de las emisiones de carbono⁶ (Greenstone et al., 2013, Golosov, et al., 2014, Antoff, et al., 2009, Watkins, et al. 2006). De este modo, el CSC expresa el valor presente de los costos sociales (daño social marginal) presentes y futuros que ocasiona una tonelada extra de carbono emitida a la atmósfera (Hope, 2006).

Así, el CSC se obtiene de monetizar los costos económicos del cambio climático simulando diversas trayectorias a futuro (Anthoff, et al., 2011). Normalmente, este impacto adicional del carbono se deriva de la diferencia entre el escenario inercial (Business as usual (BAU)) y el escenario

³ Es importante notar que 1 tonelada de carbón equivale a 3.664 toneladas de CO₂ de modo que un valor de 100 dólares la tonelada de carbón equivale a 27 dólares la tonelada de carbono (Watkiss, et al, 2006).

⁴ Sinónimos del costo social del carbono son impuesto al carbono o precio al carbono y miden “el precio de mercado al derecho de emitir una tonelada de carbono a través de la quema de combustibles fósiles” Nordhaus (2007) pp. 30.

⁵ En estricto sentido existen dos métodos para estimar el CSC. En el primer caso, se estima el costo marginal de las emisiones, que es igual, en el óptimo, al costo marginal de abatir emisiones, tomando como referencia la trayectoria óptima de emisiones. En el primer caso conocido como análisis de costo beneficio, el CSC equivale al impuesto al carbono (que es el precio sombra de las emisiones) que permite alcanzar el nivel óptimo de emisiones. Esto es, el daño marginal se estima en el punto óptimo de emisiones. De este modo, el punto óptimo se define como aquel donde se intersectan las curvas de daño marginal (DM) y la curva marginal de costos de abatimiento (CMCA). En el segundo caso, conocido como análisis de costo marginal, se estima directamente la diferencia entre los daños causados por el cambio climático por un cambio marginal en las emisiones de CO₂ (Clarkson y Deyes, 2002).

⁶ EL CSC se refiere también como el costo marginal de los daños del cambio climático (Kuik, 2008).

considerado, atendiendo a períodos de 10 años (Gosolov, et al. 2014, Nordhaus, 2014)⁷. De este modo, las diferencias en los impactos económicos ajustadas por las emisiones representan el costo adicional del carbono que implica el daño que puede evitarse de eliminarse o suprimirse una tonelada de carbono en cierto momento en el tiempo (Anthoff, et al., 2011). El CSC se expresa en dólares por tonelada de carbono. Es común utilizar el escenario del IPCC (1990) donde el doble de emisiones de gases de efecto invernadero ocasiona un aumento de la temperatura de 2.5oC como escenario BAU (Clarkson y Deyes, 2002).

Las estimaciones del CSC tienen, normalmente, como fundamento el uso de Modelos de Análisis Integrados (MAI). Estos MAI contienen varios bloques en donde destacan: el bloque donde se incluyen las relaciones entre emisiones de gases de efecto invernadero (flujos) y los niveles de concentración de CO₂ en la atmosfera, el bloque donde se incluyen los niveles de concentración de las emisiones en la atmosfera y los cambios en la temperatura (en algunos casos se incluyen además probabilidades de eventos extremos) y el bloque donde se especifican las relaciones entre los cambios en la temperatura y los daños físicos y su valuación económica (Pearce, 2003). De este modo, un MAI contiene los siguientes bloques representados por las siguientes ecuaciones⁸.

La primera ecuación⁹ estima la relación entre el flujo y el acervo de emisiones de gases de efecto invernadero donde el primer término de la derecha representa el proceso de reducción paulatina de las concentraciones de GEI derivada de los ciclos de vida del carbono y el segundo término representa el nuevo flujo que se incorpora al acervo:

$$(2) \quad CGEI_t = \left(1 - \frac{1}{L}\right) CGEI_{t-1} + \psi GEI_t$$

Donde CGEI_t representa los niveles de concentración en la atmosfera de GEI, L es el tiempo de vida del carbono en la atmosfera y ψ es el factor de emisiones para convertir el flujo de emisiones (en toneladas de carbono) en niveles de concentraciones (acervo) en la atmosfera (partes por millón –ppm-).

El segundo bloque de ecuaciones establece la relación entre los niveles de concentración de GEI en la atmosfera y los cambios en la temperatura global a través de incorporar el proceso de forzamiento radiactivo que calienta a la atmosfera que, a su vez, calienta la capa superior del océano que, a su vez, calienta a la capa inferior del océano (Pearce, 2003).

$$(2.1) \quad T_t^U = T_{t-1}^U + \frac{1}{R^U} \left[F_t - \lambda T_{t-1}^U - \frac{R^L}{\theta} (T_{t-1}^U - T_{t-1}^L) \right]$$

$$(2.2) \quad T_t^L = T_{t-1}^L + \frac{1}{R^L} \left[\frac{R^L}{\theta} (T_{t-1}^U - T_{t-1}^L) \right]$$

Donde T es la temperatura, U denota la capa superior del océano, L es la capa inferior del océano, R corresponde a la capacidad termal de las capas de los océanos, F es el forzamiento radiactivo, ϕ es la tasa de transferencia entre las capas superiores e inferiores de los océanos y λ es el parámetro que relaciona el aumento en el forzamiento radiactivo con el aumento de temperatura.

La tercera ecuación establece la relación entre el aumento de temperatura y los daños económicos (Fankhauser, 1995, Pearce, 2003):

$$(3) \quad D_t = k_t \left(\frac{T_t^U}{\Delta T_t} \right)^\gamma (1 + \psi)^{\gamma-1-t^{\gamma-1}}$$

Donde k_t representa las daños estimados en la línea base derivada de un aumento del doble de concentraciones en la atmosfera con respecto a la era pre-industrial, ΔT es el aumento de la temperatura en

⁷ Por ejemplo, en el estudio de Stern (2007) se estima el CSC derivado de las emisiones de gases de efecto invernadero calculando los daños que ocasiona el cambio climático en comparación a una trayectoria donde las emisiones no ocasionan daño alguno. Ello se define como el crecimiento balanceado equivalente (Hope, 2006).

⁸ La descripción del modelo MAI se basa en Pearce (2003).

⁹ Se mantiene la notación de Pearce (2003) en la medida de lo posible.

el escenario BAU que se define como el caso donde se dobla el nivel de concentraciones de CO₂ en la atmósfera (2 X CO₂) con respecto a la era pre-industrial y que se asocia con un aumento de 2.5°C de la temperatura global, γ es un parámetro que relaciona temperatura y daño económico y donde normalmente se ubica entre 1-3 con un valor medio de 1.3 (Pearce, 2003), ϕ es un parámetro que hace más grandes los daños en caso de ocurrir antes de t^* y más pequeños de ocurrir posteriormente a t^* , t^* es el año donde se espera que las concentraciones sean el doble con respecto a los niveles pre-industriales (normalmente 2050) y $t^{\Delta T}$ es el año donde sucede el aumento de 2.5°C de temperatura.

La cuarta ecuación estima el valor presente neto de los daños económicos derivados de cambios en las emisiones ponderados por una tasa de descuento. Esta ecuación permite además estimar el daño marginal de una tonelada adicional de emisiones de CO₂ emitida a la atmósfera que se traduce en el CSC:

$$(4) \quad \text{VPN}_t = \sum_0^t \frac{\partial D_t}{\partial \text{GEI}_t} (1+r)^{-t}$$

Donde VPNT es el valor presente neto, Dt son los daños en valor económico, GEIt son las emisiones de gases de efecto invernadero y r es la tasa de descuento.

La quinta ecuación indica que existe una correlación positiva entre el daño económico esperado con el aumento paulatino del nivel de PIB per cápita y de la población.

$$(5) \quad \frac{k_t}{k_{t-1}} = (1 + \omega \Delta \text{YPC}_t + \Delta \text{POB}_t)$$

Donde ΔYPC_t es la tasa de crecimiento del ingreso per cápita, ΔPOB_t es la tasa de crecimiento de la población, ω es la elasticidad ingreso de la disponibilidad a pagar (*willingness to pay*) para evitar el daño derivado del cambio climático que normalmente se utiliza con un valor de entre 0.3 y 0.4 (Pearce, 2003)¹⁰.

Existe una multiplicidad de estimaciones sobre los costos sociales del carbón, incluyendo algunos trabajos que buscan sintetizar¹¹ las estimaciones del costo social del carbono. En principio, los principales puntos de debate e incertidumbre sobre las diversas estimaciones del CSC pueden agruparse en:

1) Tasas de descuento y ponderaciones por equidad (*equity weights* EW) (ecuaciones 3, 4, 5 y 6). Los efectos negativos del cambio climático, y por tanto el CSC, son diferenciados por regiones y en el tiempo por lo que para agregarlo es necesario considerar dos opciones: En primer lugar, debe considerarse la presencia de una utilidad marginal del ingreso decreciente de modo que los efectos negativos deben ponderarse con mayor intensidad en una persona pobre que en una persona rica, ello se conoce como ponderaciones por equidad. La inclusión de la función social de bienestar con ponderación por equidad¹² por regiones del mundo atendiendo a las diferencias en los niveles de ingreso per cápita (Hope, 2008), puede definirse como (Pearce, 2003):

$$(6) \quad D_{\text{glob}} = D_R \left[\frac{Y^m}{\text{YPCRR}} \right]^\varepsilon + D_P \left[\frac{Y^m}{\text{YPCRP}} \right]^\varepsilon$$

Donde Y^m el ingreso medio, YPCRR es el ingreso de los países ricos, YPCRP es el ingreso per cápita de los países pobres y ε es la elasticidad de la utilidad marginal del ingreso que es conocida como la aversión a la desigualdad y que normalmente se ubica entre 0.5 y 1.2 (Pearce, 2003). La modificación en estas ponderaciones conlleva a cambios substanciales en el CSS, incluso de diferente dirección y signo. Por ejemplo, Hope (2011) muestra que la inclusión de EW lleva al CSS de 70 a 170 dólares la tonelada en el estudio de Stern (2007) y de 70 a 30 dólares la tonelada de CO₂ con el modelo de Nordhaus (2009).

¹⁰ Fankhauser (1995) utiliza un valor de 1 en este parámetro.

¹¹ Los análisis del CSC no son meta-análisis en estricto sentido sino síntesis de la investigación ya que no cumplen los requisitos muestrales para considerarse meta-análisis (Nordhaus, 2011).

¹² Utilizar la ponderación por equidad (*Equity Weight*) para una política pública en un país resulta complicado ya que implica usar ponderaciones que no competen directamente al país (Pearce, 2003).

En segundo lugar, los daños en diferentes momentos en el tiempo deben ponderarse por alguna tasa de descuento. En particular debe considerarse que la utilidad marginal decreciente del ingreso y la presencia de “impaciencia” en el consumo sugieren que un ingreso futuro mayor debe ponderarse por una tasa de descuento. Así, existe un debate sobre la tasa de descuento a aplicar. La tasa de descuento seleccionada tiene implicaciones substanciales sobre la equidad entre generaciones presentes y futuras, pero también entre grupos de ingreso bajo y alto (Howarth y Norgaard, 1992, DeCanio y Niemann, 2006).

Este debate sobre la tasa de descuento a utilizar puede analizarse dentro de la tasa social de preferencias en el tiempo definida por Ramsey (Ackerman y Finlayson, 2006). Esta tasa de descuento incluye dos términos. El primer término es la tasa pura de preferencias en el tiempo que corresponde a una tasa donde todas las generaciones tienen el mismo nivel de riqueza y el segundo término corresponde al efecto de un aumento en el ingreso:

$$(7) \quad r = \rho + \theta g$$

Donde ρ representa la tasa pura de preferencias en el tiempo, θ representa la elasticidad de respuesta de la utilidad a un cambio en el consumo¹³ que se asume normalmente entre 0.5 y 3 concentrándose en 2 (Arrow 2007; Dasgupta 2007, 2008; Hall y Jones 2007; Nordhaus 2009; Szpiro 1986; Weitzman 2007, 2009) y g es la tasa de crecimiento per cápita del consumo (Ackerman y Finlayson, 2006).

El segundo término de la ecuación (7) sugiere que en el caso en que las generaciones futuras sean más ricas entonces requieren menos ayuda de la generación presente y por tanto puede aplicarse una tasa de descuento más alta. Por el contrario, puede incluso considerarse el caso donde se espera que el crecimiento económico en el futuro decline y por tanto puede usarse una tasa de descuento que disminuye en el tiempo; en el extremo, en el caso en que el crecimiento económico sea negativo puede presentarse una tasa de descuento negativa (Dasgupta, et al, 1999). Asimismo, Gerlagh y Liski (2013) muestran que la tasa de descuento debe seleccionarse de acuerdo al horizonte de tiempo a considerar. En este debate destaca, por ejemplo, el uso en el informe Stern (2007) de una tasa de preferencias de 0.1% en contraposición al uso de una tasa anual de preferencias en el tiempo de 1.5% y una elasticidad del consumo de 1.45%¹⁴ en el estudio de Nordhaus (2014). El uso de estas diferentes elasticidades en las tasas de descuento conlleva a resultados substancialmente diferentes incluso dentro de los mismos MAI. Por ejemplo, Cline (2004) utiliza $\rho = 0\%$, $\theta = 1.5\%$ y $g = 1\%$ en el modelo DICE de Nordhaus y deriva, incluso, la necesidad e importancia de realizar fuertes acciones en el presente.

El debate sobre las tasas de descuento incluye el uso de tasas decrecientes en el tiempo o hiperbólicas. Esto es, se aplican tasas que disminuyen en el futuro atendiendo a la necesidad de que el futuro distante este adecuadamente ponderado en las decisiones de bienestar (una tasa de descuento elevada reduce su relevancia a valor presente) (Pearce, et al. 2003, Frederick, et al. 2002). Esta selección tiene consecuencias importantes (Weitzman, 1998), por ejemplo, Ackerman y Finlayson (2006) muestra que distintas tasas de descuento pueden llevar al CSC a 600 dólares la tonelada de carbono e incluso sugiere que tasas decrecientes pueden aun trivializar algunos de los daños futuros.

En este debate además debe considerarse que actualmente existen tasas de descuento que son utilizadas por diferentes gobiernos para realizar sus evaluaciones de costo- beneficio. Por ejemplo, el gobierno de Estados Unidos utiliza tasas de descuento anuales de entre 3% y 7% (Anthoff, et al. 2011).

2) Métodos para la valoración económica de los efectos del cambio climático sobre las actividades económicas, el bienestar social y los ecosistemas (ecuaciones 3, 4, 5 y 6). En ello destaca las discusiones sobre los métodos de valoración económica para bienes y servicios que no tienen un valor económico asignado directamente o que su valor económico asignado resulta altamente debatible. Por ejemplo, el cambio climático deriva en la pérdida de biodiversidad o en la pérdida de vidas

¹³ Evidencia indirecta el valor de θ está en Ha-Duong y Treich (2004).

¹⁴ Debe destacarse que en los estudios de Nordhaus se encuentran diferentes tasas de descuento que permiten analizar la sensibilidad de los resultados a distintos supuestos.

humanas y se asocia con diversas enfermedades (respiratorias o de olas de calor). De este modo, el CSC requiere asignar un valor o costo económico a la pérdida de biodiversidad a través de valorar los bienes y servicios eco sistémicos o de procesos de valuación contingente. Asimismo, los valores que se asocian a la vida humana o a ciertas enfermedades resultan particularmente discutibles.

Además, aún existe un alto nivel de incertidumbre sobre los efectos netos finales del cambio climático al incorporarse distintos procesos de adaptación. Los modelos MAI identifican un costo monetario de los impactos del cambio climático que supone ciertos procesos de adaptación de los agentes económicos. Sin embargo, la evidencia internacional (Mendelsohn y Seo 2007, Schlenker, Hanemann y Fisher 2005) muestra que la magnitud de los impactos finales depende en gran medida de los posibles procesos de adaptación y que muchos de estos procesos de adaptación son aun escasamente incorporados a los MAI. Por ejemplo, Plambeck y Hope (1996) estiman el costo marginal del carbono en 32 dólares por tonelada sin incluir procesos de adaptación y en 21 dólares incluyendo procesos de adaptación. Asimismo, en las actividades agrícolas se observa, a través del uso de micro-datos, que la irrigación, el cambio de cultivos o la transición a combinar actividades agrícolas y pecuarias son procesos de adaptación pero que estas respuestas son diferenciadas por tipo de productor, de clima y de otros factores socioeconómicos lo que difícilmente se puede incluir en los MAI actuales (Mendelsohn y Dinar 2009, Mendelsohn y Seo, 2007).

3) Incertidumbre, riesgo, puntos de no retorno, eventos extremos y colas gordas (*fat tails*) (ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5 y 6). La evidencia disponible y la construcción de escenarios de largo plazo que incorporan variables económicas, sociales demográficas y variables climáticas son ciertamente complejas e implican un alto grado de incertidumbre. Más aun, el cambio climático debe incorporar la posibilidad baja de efectos catastróficos pero cuya distribución de probabilidad puede aumentar en el futuro, la presencia de efectos irreversibles y de puntos de quiebre (Pyndick, 2013, Stern 2013, Nordhaus 2016, Hope 2006 y Hope, 2011). La evidencia disponible muestra que la incorporación de estos eventos extremos modifica substancialmente la estimación de los costos económicos finales del cambio climático y por lo tanto los valores del CSC. Por ejemplo, los efectos de eventos extremos en el modelo DICE pueden ocasionar pérdidas por 30% del PIB (Nordhaus y Boyer, 2000).

Por lo tanto, existen diversos métodos para incluir estos eventos extremos en el CSC que van desde utilizar variables aleatorias, funciones de probabilidades o la construcción de escenarios extremos (Fankhauser, 1994, Clarkson y Deyes, 2002). Asimismo, la incorporación de diferentes niveles de riesgo en los MAI modifica los CSC (Antoff, et al., 2011).

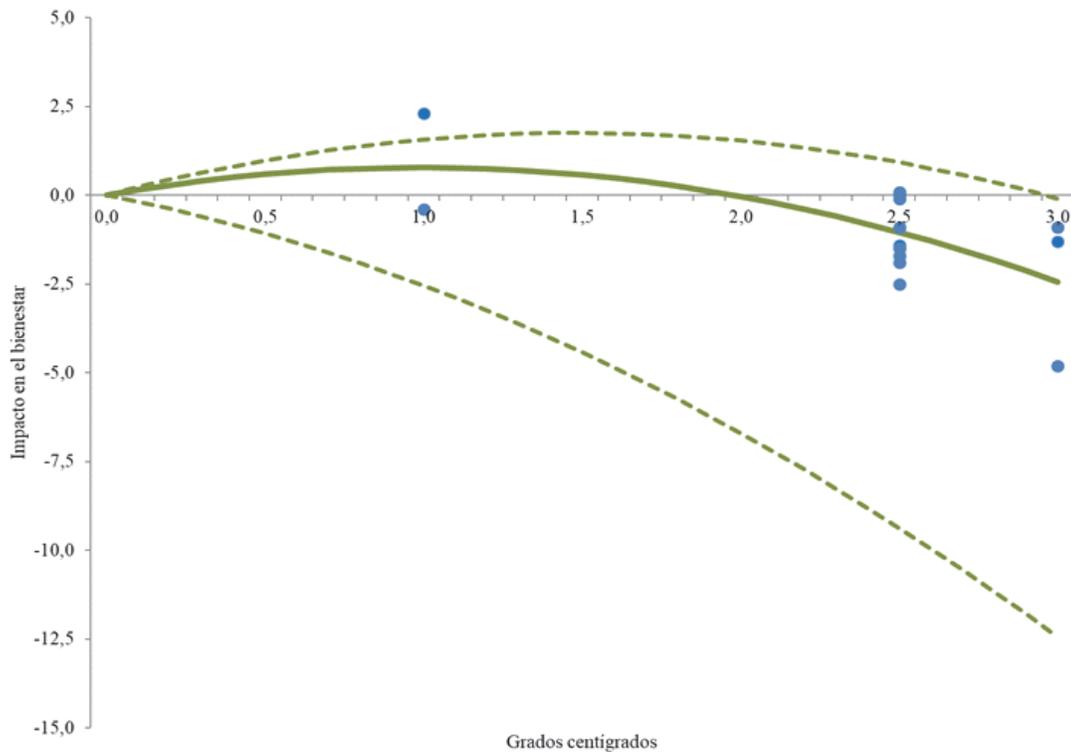
4) La ciencia del clima (ecuaciones 2 y 3). Existe una incertidumbre importante sobre varias relaciones entre las emisiones de GEI, el ciclo de vida del carbono y los efectos en el clima en donde destacan (Clarkson y Deyes, 2002):

- Incertidumbre sobre el nivel actual y futuro de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Incertidumbre sobre el acervo de emisiones que depende del flujo de emisiones, de la vida de los contaminantes y de la capacidad de absorción de estas emisiones (Clarkson y Deyes, 2002). Así, por ejemplo, existe una fuerte incertidumbre sobre la capacidad de los boques o de los océanos para almacenar CO₂ o sobre el ciclo de carbono (Joos, et al, 1999). Asimismo, debe considerarse que las consecuencias del flujo de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera depende del acervo o nivel acumulado y por tanto el efecto del flujo de las emisiones se modifica en el tiempo (Clarkson y Deyes, 2002).
- Incertidumbre sobre la sensibilidad climática; esto es, las sensibilidades de respuesta del clima a las concentraciones de gases de efecto invernadero (Hope, 2008 y 2011). En este contexto, existe también una incertidumbre importante sobre los procesos de retroalimentación entre el aumento de la temperatura y otros efectos climáticos como modificaciones en los patrones de precipitación, el incremento en el nivel de mar o la reducción de la criósfera.
- incertidumbre sobre los efectos físicos y biológicos del cambio climático. Ello incluye, por ejemplo, la incertidumbre sobre la probabilidad y los efectos eventos climáticos extremos.

Así, estas diferencias en los supuestos exógenos y en los parámetros de los MAI y en el tratamiento de las incertidumbres derivan en distintas estimaciones de los costos económicos del cambio climático¹⁵ como se puede observar en los gráficos 1 y 2. Así, por ejemplo, estudios que utilizan el escenario BAU de doblar emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a la era preindustrial (2XCO₂) estiman un daño del PIB global de entre 2.1 y 2.4% (Ayres y Walter, 1991), de 1.5% con rangos entre 1% y 2% (Fankhauser, 1994), de 1.33% (Nordhaus, 1991), de entre 1.5 y 2% (Pearce, 1995) y de 1% (Cline, 1992) y Gerlagh y Liski (2013) estiman, con un modelo de equilibrio general computable, daños económicos derivados del cambio climático de 2.7% con un aumento de temperatura de 3oC.

Estudios más recientes como Nordhaus (2008) estiman un costo económico de 0.48% del PIB global actual con un aumento de 2.5o C de temperatura y de 30% del PIB global actual con un aumento de 6o C de temperatura (escenario catastrófico). Por su parte, Stern (2007) estima costos económicos derivados del cambio climático en el largo plazo de entre 5% y 20% del PIB (véase el gráfico 3).

Gráfico 1
Estimaciones del impacto económico mundial del cambio climático

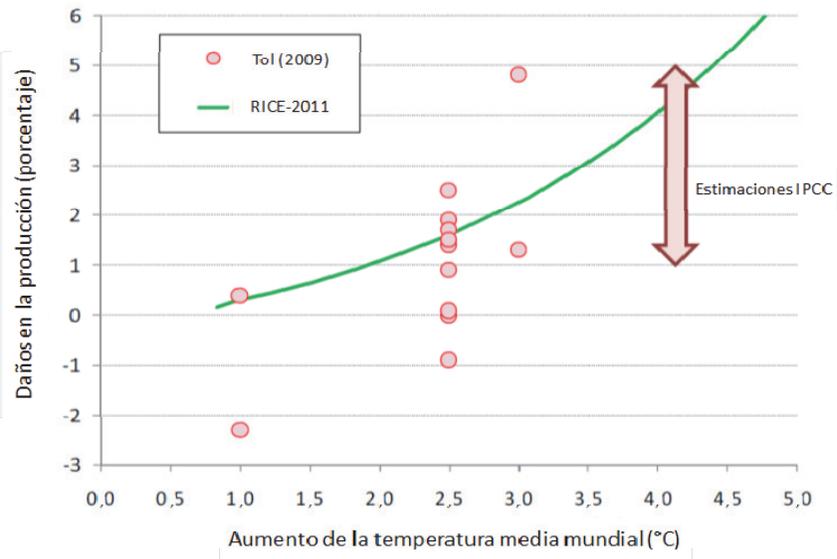


Fuente: Tol (2010)

Nota: 14 estimaciones del impacto económico mundial del cambio climático, expresadas en la pérdida del ingreso equivalente al bienestar, en función del aumento de la temperatura media global actual. Los puntos representan las estimaciones, la línea central es el ajuste de mínimos cuadrados para las 14 observaciones: Las dos líneas externas son el intervalo de confianza del 95%.

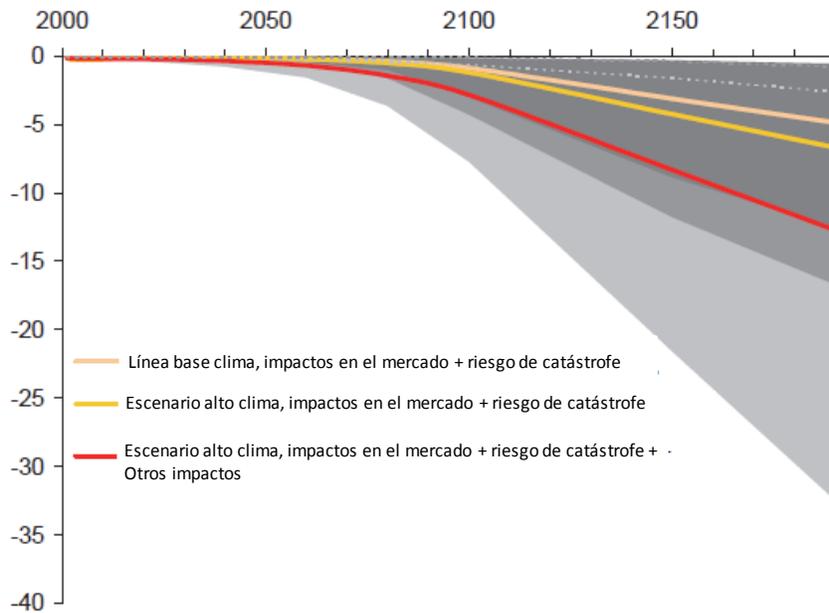
¹⁵ Los principales costos económicos del cambio climático se derivan de los siguientes sectores: agropecuario, energía, hídrico, salud, bosques y biodiversidad, eventos climáticos extremos.

Gráfico 2
Estimaciones del impacto del cambio climático en la economía global



Fuente: Nordhaus 2011

Gráfico 3
Los impactos del cambio climático en el crecimiento y desarrollo



Fuente: Stern (2007)

Recuadro 1**El Costo Social del Carbono y la política pública**

El costo social del carbono, desde la óptica de la política pública, puede incluirse en los análisis de costos beneficio que permiten determinar la viabilidad económica de un proyecto específico. Asimismo, debe incluirse el principio precautorio. Esto es, las medidas de política pública deben instrumentarse, no solo atendiendo al análisis de costos beneficio, sino también atendiendo a los casos donde exista una baja probabilidad de un efecto catastrófico o irreversible.

Así por ejemplo, el CSC de 70 libras con un margen de entre 35 y 140 libras por tonelada de carbono se ha utilizado en Inglaterra en el análisis costo beneficio de diversos proyectos públicos en donde destacan (Watkiss et al., 2006):

Organización	Aplicación	Observaciones
Departamento de ambiente, alimentación y asuntos rurales	Evaluación de impacto regulatorio del gas.	Uso de £35- £140/tC. El número es de gran diferencia al RIA de opciones específicas
Departamento de Transporte	Análisis costo-beneficio del TES del Reino Unido. Considerando los cargos por impuestos sobre residuos en el marco de la revisión y consulta.	Uso de £35-£140/tC.
	Utilización para el nuevo enfoque de la evaluación de la infraestructura de transporte por carretera.	Uso de £35- £140/tC. El CSC es muy bajo en relación a otros flujos de costos y beneficios en los resultados de la evaluación.
	Incorporación en el modelo de transporte nacional/modelo de precios sociales Considerado en el análisis de la carga de los usuarios de carreteras y documentos de consulta.	Uso de £35- £140/tC. Con central en £70/Tc
Departamento de Comercio e Industria	Libro Blanco de Energía. Utilizado en el RIA actual para renovables. Obligación II	Uso de £70/tC como referencia para los costos de opciones hasta 2020.
Oficina de Mercados de Gas y Electricidad	La inversión en energía, en particular la extensión de la red de gas, alguna consideración de la infraestructura de transmisión de electricidad (por ejemplo, pérdidas de distribución bajo el control de precios de distribución)	Uso de 0, £35/tC
Agencia de Medio Ambiente	Programa de gestión de activos.	

Fuente: Elaboración propia.

II. El costo social del carbono: revisión de la literatura

Actualmente existe una multiplicidad de estimaciones del CSC realizadas con diversos métodos y para distintos propósitos. En este contexto, destacan, en particular en las últimas dos décadas, aquellas estimaciones del CSC que son normalmente derivadas de modelos integrados tales como los modelos DICE (Dynamic Integrated Model of Climate-Economy model)¹⁶ y RICE (Regional Integrated Model of Climate-Economy model), que son quizás los modelos más utilizados en economía del cambio climático (Nordhaus, 1992, Nordhaus y Boyer, 2000); el modelo PAGE (Policy Analysis of the Greenhouse Effect) (Hope, 2006), ampliamente reconocido desde el informe Stern (2007), el modelo dinámico estocástico de equilibrio general computable (DSGE) de Golosov et al. (2014), técnicamente muy sólido o incluso el modelo FUND (The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) (Tol, 1997) que permiten simular diversos escenarios para estimar el CSC. Esos modelos se utilizan con una gran diversidad de especificaciones y escenarios que conllevan a diversos resultados puntuales¹⁷ (Li y Nordhaus, 2013).

¹⁶ El modelo DICE contiene un modelo macroeconómico de crecimiento donde los combustibles fósiles son insumo de la producción que ocasiona las emisiones de CO₂. Este aumento de las emisiones en los diferentes bloques del modelo se traduce en un aumento de la temperatura. Este aumento de la temperatura tiene, eventualmente, efectos negativos sobre la economía. Existe además la posibilidad (baja) de una pérdida catastrófica de 30% del producto total (Ackerman y Finlayson, 2006).

¹⁷ Véase Clarke et al. (2009) para una descripción de los 10 modelos MAI más utilizados.

Recuadro 2

Impuestos al carbono: evidencia internacional

En la actualidad los impuestos al carbono se aplican en diversos países. Los rangos de estos impuestos oscilan desde 1 dólar por tonelada en países como México Polonia y Ucrania, hasta 126 dólares en Suecia. Actualmente, existen 20 esquemas de impuestos al carbono a nivel nacional y dos a nivel regional en Canadá (Ecofys, 2017). El valor promedio de estos impuestos, es de 22.1 dólares por tonelada.

A principio de 2017, 17 sistemas de comercio de emisiones (SCE) están en operación en todo el mundo, tres sistemas están en planeación y 13 están en discusión a niveles regional y nacional (ICAP, 2017). Cada sistema tiene sus propias características, entre otras el diseño técnico, los gases cubiertos, así como su volumen, los sectores participantes, la asignación de los derechos, el permiso de usar créditos internacionales y la meta específica que el sistema debería ayudar a cumplir (ICAP, 2015). En términos del volumen, el SCE de la Unión Europea (UE) es el más grande a nivel internacional cubriendo 2 GtCO_{2e}. A nivel nacional, el conjunto de los siete SCE existentes en China forman el mercado más grande con 1 GtCO_{2e}. Para el caso de los derechos de emisión de la Unión Europea en los últimos años, una serie de factores han causado que el precio de los derechos de emisión disminuya drásticamente de 28 euros a menos de 5 euros. Sin embargo, es importante considerar que el actual precio del carbono del SCE de la UE no refleja el costo total de las políticas y medidas de mitigación de la UE (ICAP, 2017).

Fuente: Elaboración propia.

Así, el IPCC (grupo de trabajo III) (1996), en un trabajo pionero basado en una recolección de estudios, sugiere un rango de entre 5 a 125 dólares por tonelada de carbono (Clackson y Deyes, 2002). Asimismo, en la literatura económica aplicada sobre el CSC destacan, por ejemplo, las estimaciones iniciales de Pearce (1996) que indican que el costo social del carbono se ubica entre 5 y 125 dólares por tonelada de CO₂ (precios del año 2000) y entre 7 y 154 para 2010, a precios de 1990. Posteriormente, Pearce (2003) identifica un CSC de entre 3 y 6 libras la tonelada de carbono que con ponderación por equidad (*Equity Weight*) tiene un rango de entre 3 a 16 libras. Estos valores ajustados por evidencia recolectada en Estados Unidos y por una tasa de descuento decreciente, suben a un rango de entre 3 y 15 libras y que puede llegar a entre 4 y 27 libras por tonelada de carbono.

Por su parte, Nordhaus (2011)¹⁸ estima, para 2015, un precio de 44 dólares por tonelada de carbón que equivale a 12 dólares por tonelada de CO₂ (dólares de 2005); posteriormente Nordhaus (2014) estima el CSC en 18.6 dólares por tonelada de CO₂ para 2005 (precios del 2005) y en el caso de considerarse un escenario para estabilizar la temperatura en no más de 2o C y un escenario de eventos extremos entonces el CSC llega a 25 y 47 dólares por tonelada de CO₂ respectivamente. Recientemente, Nordhaus (2016) argumenta que el CSC es de 31 dólares por tonelada de CO₂ para 2015. Además, estimaciones adicionales (Ackerman y Finlyason, 2006), con un escenario base del modelo DICE (Nordhaus y Boyer, 2000), indican que el precio óptimo del carbono¹⁹ es de 6 dólares en 1995, de 10 dólares en 2005 y de 140 dólares en 2095. Por su parte, Gosolov et al., (2014) argumenta que el modelo de Nordhaus (2008), con tasa de descuento de 1.5% anual, deriva en un impuesto óptimo de 27 dólares la tonelada de carbono en 2005 que sube a 42 dólares en 2015, mientras que utilizando el modelo del estudio Stern (2007), con una tasa de descuento de 0.1%, se obtiene un impuesto óptimo de 250 dólares a la tonelada de carbono. Gosolov et al. (2014) utilizando los mismos supuestos, en su modelo DSEG, encuentra para los escenarios de Nordhaus (2008) y Stern (2007) impuestos óptimos de 57 y de 500 dólares por tonelada de carbono respectivamente. Además, Gosolov et al. (2014) argumenta por un impuesto óptimo, con una tasa de descuento anual del 1.5%, de aproximadamente 60 dólares por tonelada de carbono y para una tasa de descuento de 0.1% de 500 dólares por tonelada de carbono. Asimismo, estima un CSC de 19 dólares por tonelada de carbono con un rango (entre 5-95%) de entre 4 y 51 dólares. Posteriormente, Hope et al. (2006) estima un SCC de 90 dólares por tonelada de CO₂ con

¹⁸ Nordhaus (2007) estima con el modelo RICE un precio de 17 dólares la tonelada de carbono (precios de 2005) que aumenta a 70 dólares la tonelada de CO₂.

¹⁹ Dólares de 1995.

un rango de entre 18 y 237 dólares por tonelada de CO₂. A su vez, Maddison (1995) estima un impuesto óptimo de 16.84 dólares la tonelada de carbono (precios de 2000).

Las estimaciones del CSC, con el modelo PAGE95, se ubican, en un rango de entre 5% y 95%, de confianza entre 12-60 dólares por tonelada de carbono con una media de 26 dólares (a precios de 2000) (Plambeck y Hope, 1996, Hope, 2008). Destaca además que el CSS estimado, con una versión reciente del PAGE09 es de 100 dólares por tonelada de CO₂ para mantenerse por abajo del escenario de un aumento de 2oC, con rangos de entre 10 a 270 (dólares de 2005) y de 50 dólares por tonelada de CO₂ en el escenario bajo.

Finalmente, los estudios, con base en un meta-análisis²⁰ o síntesis de la literatura, indican, por ejemplo, que el CCS difícilmente debe exceder 50 dólares por tonelada de carbono (Tol, 2005). Esto es, Tol (2005) identifica una media de CSS de 93 dólares por tonelada de carbono con un escenario extremo de 359 dólares; ello incluyendo toda la literatura disponible, sin embargo, ponderando por diversos factores como tipo de literatura y tasas de descuento se observa que un valor por arriba de 50 dólares es poco probable²¹. Asimismo, estima, con un meta-análisis, un CSC de entre 34-42 por tonelada de CO₂. Nuevamente, Tol (2009) argumenta, con un meta-análisis, un CSS de entre 25-50 y Tol (2010) estima, con un meta-análisis, un CSC de 180 dólares por tonelada de carbono pero destacando que estimaciones más recientes disminuyen el valor del precio del carbono. Por su parte, Watkins et al. (2006) estiman, con base en una síntesis de la literatura derivadas de los trabajos de Tol, una media de 93 dólares la tonelada de carbono con un valor superior de 350 dólares la tonelada de CO₂ y sugieren un valor de 35 libras por tonelada como razonable en el espectro bajo.

Asimismo, la inclusión explícita del principio de precaución y de otros elementos relevantes como migraciones o inestabilidad política aumenta el valor del CSC; por ejemplo, van der Bergh et al. (2014) llega a un valor de 125 dólares la tonelada de carbono que aumenta incluyendo eventos extremos a 346 (Dietz, 2011) y entre 241-445 dólares por tonelada de CO₂ (Ackerman y Staton, 2011)²². Incluso, van der Bergh (2014) argumenta que incluyendo la incertidumbre en el modelo FUND de Tol eleva el CSC de 11 a 32 dólares por tonelada de CO₂.

En este contexto, se observa que existen también estimaciones que permiten definir una tasa de crecimiento del CSS a lo largo del tiempo. Por ejemplo, Nordhaus estima una tasa de crecimiento anual del CSC hasta el 2050 de 3% anual, Hope (2006) estima que la tasa de crecimiento anual del SCC es de 2.4% y Anthoff, et al. (2011) estiman, con una síntesis de la literatura, una tasa de crecimiento promedio anual de 2.3% de los costos sociales del carbono con un rango de entre 0.9% y 4.1%. Asimismo, en el estudio encargado conjuntamente por el departamento del Tesoro (HM Treasury) y el Departamento de Medio Ambiente, Alimentos y Asuntos Rurales (DEFRA) de Inglaterra (Clackson y Deyes, 2002) se sugiere un aumento del CSC de 1 libra por año.

Existen también estimaciones del CSS utilizadas por gobiernos e instituciones públicas:

- Por ejemplo, un grupo especial de trabajo del gobierno de Estados Unidos, incluyendo a la Casa Blanca, la agencia de Protección Ambiental (EPA), los departamentos de agricultura, comercio, energía y transporte y el Tesoro, deriva una media de 21 dólares por tonelada de emisiones de CO₂ para 2010 que aumenta a 26 dólares en 2020 (Greenstone et al., 2013).

²⁰ Nordhaus (2014) argumenta que los trabajos de Tol (2009) no pueden llamarse meta-análisis debido a que la muestra en realidad depende de muy pocos modelos.

²¹ La relevancia de ponderar por equidad (Equity Weight) se observa en que en el meta-análisis de Tol (2005) el costo marginal medio del daño ocasionado por el cambio climático es 10 dólares la tonelada e incluyendo la ponderación por equidad sube a 54 dólares la tonelada (Kuik, et al., 2008).

²² Finalmente, Campbell-Lendrum y Woodruff, (2007) argumentan utilizar el concepto de costo social de las emisiones a la atmósfera, que incluye, por ejemplo, los costo en salud, que estiman entre 21-182 dólares por tonelada de emisiones.

- En el estudio encargado conjuntamente por HM Treasury y DEFRA de Inglaterra se argumenta que el valor del daño marginal²³ (i.e. CSC) es de 70 libras con un rango de 35 y 140 libras²⁴ (a precios de 2000)²⁵. En el estudio de Watkins et al (2006) se propone un CSC de 35 libras de valor bajo, pero con un rango de 0 a 100.
- El grupo inter-agencia de trabajo (Interagency Working Group, 2013) de Estados Unidos, en sus actualizaciones de las estimaciones utilizando cuatro modelos integrados, pasan de 7, 26, 42 y 81 dólares por tonelada de carbono reportadas en 2010 a 12, 43, 65 y 129 (a dólares de 2007) y donde el valor máximo corresponde a un escenario extremo.
- La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) estima, con los modelos FUND, PAGE y DICE, un CSC de 5, 21 y 33 con un valor extremo de 65 dólares la tonelada de CO₂ y, en una versión reciente, estima valores de 11, 33, 52 y 90 dólares por tonelada de CO₂ (van der Bergh et al., 2014).
- La Comisión Europea y el Banco de Inversión Europeo (1995) estiman un CSC, que actualmente ya no utilizan, entre 70 y 170 euros por tonelada de carbono para aplicarse en los análisis de costo beneficio de los proyectos o evaluaciones de política pública (Watkins et al., 2006).
- El Banco Mundial establece un CSC de 20 dólares la tonelada de carbono con un rango entre 5 y 40 dólares para los proyectos de energía (Watkins et al., 2006).
- En los países bajos (2001) se propuso un valor del CSC de 8.8 Euros la tonelada de carbono (Watkins et al., 2006).
- El Banco Europeo de Inversión, para proyectos de energía, propuso un valor entre 5 y 125 Euros por tonelada de carbono donde el rango bajo es función solo de daños de mercado y el rango alto incluye daños de largo plazo (Watkins, 2006).

Recuadro 3 Curvas de costos de abatimiento (CCA)

Las estimaciones sobre los costos de abatimiento de los gases de efecto invernadero se realiza también a través de identificar los costos específicos por fuentes de emisiones que implica reducir determinadas toneladas de emisiones (Watkins, et al., 2006). Estas estimaciones se reflejan en lo que se conoce como las curvas marginales de abatimiento (CMA) que representa la relación entre la relación costo-efectividad de las diferentes opciones de reducción y la cantidad total de GEI disminuida. Las CMA reflejan los costos adicionales de la reducción de la última unidad de carbono y tienen pendiente ascendente: es decir, los costos marginales aumentan con el aumento del esfuerzo de reducción. Las opciones típicas en un CCA incluyen cambiar a energía limpia, mejorar la eficiencia energética, evitar la deforestación, mejorar las prácticas agrícolas y evitar la quema de gas.

La CMA analiza datos técnicos y costos económicos incrementales para diferentes alternativas de abatimiento utilizando un enfoque ascendente, de abajo a arriba (bottom up). Así se representa como un histograma en donde el eje horizontal se grafica el potencial de abatimiento de cada iniciativa (en toneladas de CO₂e), y en el eje vertical se grafica el CMA por cada tonelada de CO₂e evitada o reducida. Las acciones incluidas en la curva de costo integran un escenario bajo en carbono y se ordenan de acuerdo al costo de forma creciente.

²³ El valor basado en Eyre et al. (1999).

²⁴ Ello es relativamente consistente con las estimaciones de los costos marginales de abatimiento del Protocolo de Kyoto en 79 dólares la tonelada de carbono y en 181 dólares la tonelada de CO₂ en Inglaterra por una reducción de 20% de las emisiones al 2010 relativas al 1990 (a precios del 2000) (Dames y Moore, 1999).

²⁵ Una aproximación de los valores de Clarkson y Deyes (2002) implica un costo social del carbono de 105 dólares por tonelada de carbono e incluyendo una ponderación por equidad (*equity weighting*) llega a un valor de entre 52 y 210 dólares por tonelada de carbono (a precios del 2000) que puede aumentar una libra por año (Hope, 2008, Guo, et al, 2006).

Recuadro 3 (conclusión)

Un ejemplo de estas MAC es, por ejemplo, la curva estimada por Mckinsey sobre el potencial de abatimiento al 2030 a nivel global (véase el gráfico 4).

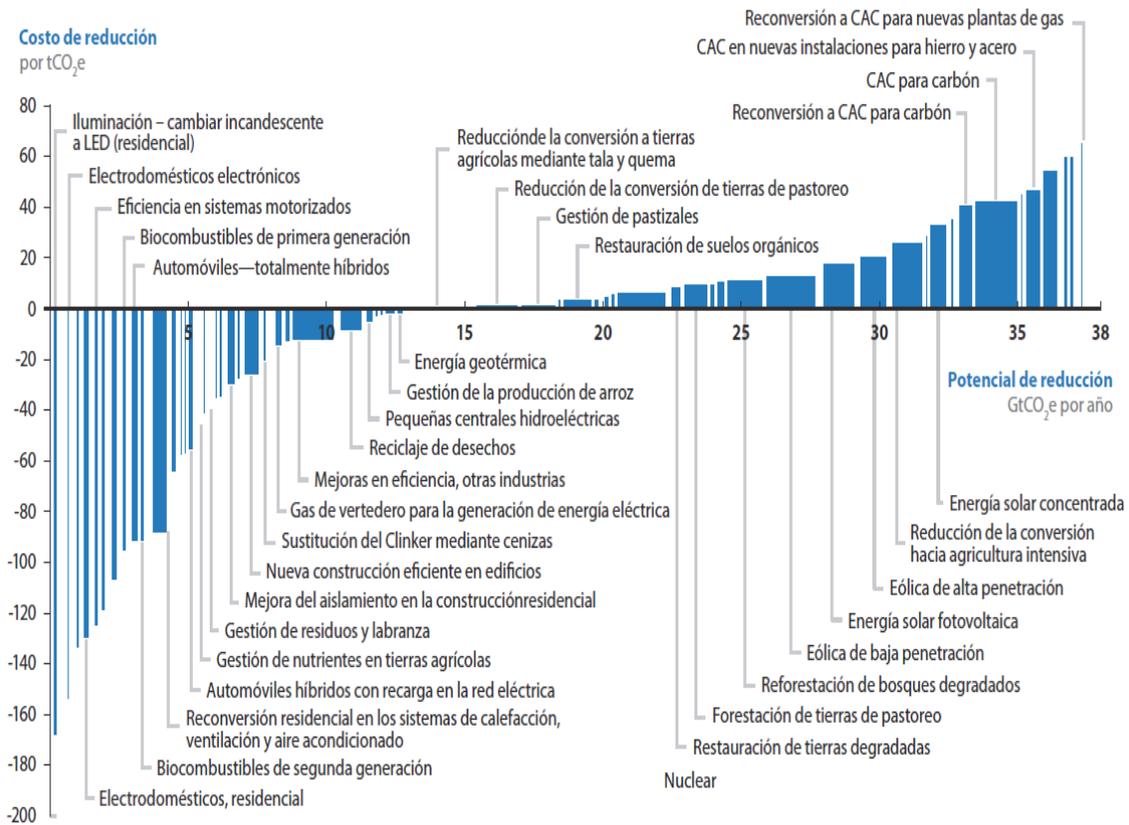
Watkins, et al (2005) sugiere un costo promedio de las CMA para las metas de reducciones de 60% en Inglaterra de 93 dólares por tonelada de carbono para el 2030 y que aumentan rápidamente a 193 y 351 dólares por tonelada para 2040 y 2050 respectivamente.

A su vez, en el reporte de European Climate Change Programme se estiman costos de abatimiento para el protocolo de Kioto de 12, y 20 euros por tonelada de carbono en 2010 y 2020 respectivamente.

El uso de MAC es favorecido por los análisis de costo efectividad mientras que el uso del CSC deriva más de aquellos que consideran el análisis de costo beneficio.

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4
Curva costo de abatimiento de GEI a nivel global 2030



Fuente: McKinsey & Company (2009).

Destaca además la existencia de una importante diferencia en los CSC de diferentes gases de efecto invernadero. Por ejemplo, Hope estima un valor medio para la tonelada de carbón de 19 dólares (que equivale a 5 dólares la tonelada de carbono), de 105 dólares por tonelada de metano y de 200 dólares la tonelada de hexafluoruro de sulfuro (SFN).

Existe además una amplia literatura que busca identificar el impuesto al carbono óptimo para alcanzar ciertos niveles de reducción. Por ejemplo, Gaskins y Weyant estiman un impuesto al carbono de 300 dólares la tonelada para reducir las emisiones al 80% de su valor en 1990 en el 2020.

Asimismo, existe una amplia literatura para un impuesto al carbono para diferentes sectores tales como la aviación. Así, Wit et al. argumentan que un impuesto de 10, 30 ó 50 euros por tonelada de CO₂ aumenta 10 el precio de los billetes de avión entre 10 y 20 euros, lo que reduciría las emisiones de CO₂ en -1%, -3.3% y -5% respectivamente. Por otro lado, Michaelis estima que un impuesto de 5, 25 y 125 dólares por tonelada de CO₂ aumenta los precios de los boletos de avión en un 2%, 10% y 50% y reduce la demanda de viajes aéreos entre 4.4-13.3% con elasticidades de precio de -0.7 y -2.1. Olsthoorn (2001) argumenta que un impuesto de 1500 dólares por tonelada de CO₂ podría reducir las emisiones de la aviación en un 90%. FitzGerald y Tol y Mayor y Tol argumentan, imponiendo una elasticidad de precio de -0.45, que un impuesto sobre el carbono en los vuelos británicos tendrá un pequeño impacto en la demanda. Por lo tanto, un impuesto global al carbono de 1000 dólares por tonelada reduce los vuelos de viaje en un 0.8% y las emisiones de CO₂ en un 0.9% (Tol, 2007). Para México, el impacto potencial de los impuestos al carbono de 10 y 30 dólares por tonelada de CO₂ conduce a una reducción del gasto total en turismo de avión de 1.4 y 4.4%, y una reducción de 0.6 y 1.7% en el número de turistas de avión desde Estados Unidos, Canadá y Europa (Galindo, et al. 2017).

Asimismo, Maddison (1995) estima, con valores de Nordhaus (1991), que el costo de remover una tonelada de carbono a través de la reforestación es de entre 5 y 26 dólares.

Recuadro 4 **El Costo Social del Carbono (CSS) y la valoración contingente**

Una forma indirecta de evaluar el CSC es a través de la valoración contingente del deseo de pagar por la aplicación de políticas públicas que atiendan el desafío del cambio climático. La valoración contingente es un método directo de valoración, que usa preferencias declaradas con base a mercado construido hipotético (no experimental) para determinar la disposición a aceptar o a pagar.

Así, por ejemplo, Li et al. (2005) identifican que los ciudadanos americanos están dispuestos a pagar 15 dólares la tonelada de CO₂, Berrens et al (2004) estiman el deseo a pagar entre 200 y 1760 dólares por hogar al año (0.2-2.3% del ingreso de los hogares) por la ratificación del Protocolo de Kioto y Hersh y Vicusi (2006) encuentran que los Europeo están dispuestos a pagar 3.7% más por el petróleo para contribuir a la solución del cambio climático Viscusi y Zeckhauser (2006), con una encuesta, identifica que estudiantes de Harvard están dispuestos a pagar 0.50 dólares más por el galón de gasolina o 3% de sus ingresos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Fuente: Kuik et al., 2008

Destaca, además, que los estudios sobre el valor del CSC muestran un comportamiento en forma de U invertida a lo largo del tiempo (Watkins, et al 2006).

En todo caso, cabe destacar que las estimaciones del CSC contienen un alto nivel de incertidumbre como consecuencia tanto de la ciencia climática como del uso de diversos métodos de análisis económico, social demográfico y político²⁶. Estas diferencias en las estimaciones del CSC reflejadas, por ejemplo, en los resultados de los estudios Nordhaus y Stern permiten sintetiza el debate sobre el CSC (Gerlagh y Liski (2013):

“But the applied climate-economy models, commonly used to evaluate the carbon price, ignore the majority of climate externalities when discounting time as needed to describe shorter-term macroeconomic choices. This fundamental puzzle of the climate-policy analysis has been fiercely debated, some emphasizing that discounting and thus policies should respect the shorter-term time preferences consistent with historical consumption choices (Nordhaus, 2007) while others put more weight on longer-term climate outcomes (Stern, 2006)” (Gerlagh y Liski 2013, pp 2).

²⁶ Véase Clarkson y Deyes (2002) para una síntesis de estas incertidumbres.

III. Síntesis de la literatura o “meta-análisis”

La evidencia disponible sobre el costo social del carbono es ciertamente muy variada y heterogénea. Existen incluso estimaciones substancialmente diferentes derivadas del mismo MAI con supuestos de comportamiento o de variables exógenas distintas o incluyendo factores adicionales.

El análisis de este conjunto de información sobre el CSC es ciertamente una tarea compleja en donde algunas de los métodos del meta-análisis resultan útiles, (Lipsey y Wilson, 2001); ello sin dejar de reconocer que las características de la muestra, derivada de solo algunos modelos, no cumple las condiciones para un meta-análisis apropiado (Nordhaus, 2014).

El meta-análisis²⁷ hace referencia a la síntesis estadística de los resultados de una serie de estudios (Borenstein et al., 2009, Glass, et al, 1981). Para ello, se realiza una recopilación sistemática de estudios empíricos y sus resultados, siendo cada resultado un efecto (*treatment effect* o *size effect*) que refleja la relación entre dos variables (Stanley, 2001). Estos efectos se analizan conjuntamente para conseguir la consistencia o heterogeneidad entre los estudios y con ello estimar un efecto síntesis (*summary effect*) (Glass, et al, 1981). Así, se realiza una ponderación de los efectos de los diferentes estudios lo que permite identificar la media ponderada de los efectos individuales (Borenstein et al, 2009), donde se combina el efecto (ϵ_i) y la varianza reportada en cada estudio (V_{ϵ_i}).

De este modo, el mecanismo bajo el que se realizan estas ponderaciones depende de los supuestos que se tengan sobre la distribución de los efectos individuales (ϵ_i) (Lipsey y Wilson, 2001). Por un lado, se puede considerar que existen efectos fijos, es decir que todos los estudios comparten un efecto común. De modo que, se entiende que los factores que pueden determinar la magnitud de los efectos individuales son los mismos para todos los estudios, por lo que el valor o efecto síntesis que se obtenga de los estudios será el mismo y las diferencias serán explicadas por un error aleatorio. Así, la ponderación que se da a cada estudio está determinada por la inversa de su desviación estándar individual (Borenstein et al, 2009):

$$(8) \quad W_i = \frac{1}{V_{\epsilon_i}}$$

²⁷ Véase para una síntesis de la metodología del meta-análisis Galindo, et al, (2016).

Partiendo de esta estimación, se obtiene la media ponderada dividiendo el efecto individual por su ponderación respectiva, entre la suma de las ponderaciones. Teniendo el valor de k , como el número de estudios se obtiene (Borenstein, et al, 2009):

$$(9) \quad M = \frac{\sum_{i=1}^k W_i Y_i}{\sum_{i=1}^k W_i}$$

Donde la varianza de esta media, que es el efecto síntesis, es el recíproco de la suma de las ponderaciones y su desviación es la raíz de éste.

$$(10) \quad V_M = \frac{1}{\sum_{i=1}^k W_i}$$

$$(11) \quad SE_M = \sqrt{V_M}$$

La prueba de significancia estadística (valor Z) para analizar la hipótesis nula de que el efecto síntesis es cero, se calcula dividiendo el efecto síntesis entre su desviación estándar:

$$(12) \quad Z = \frac{M}{SE_M}$$

Por otro lado, se tiene que pueden existir efectos aleatorios, en otras palabras, no se asume que los estudios son idénticos y producen un efecto igual, de tal manera que el efecto síntesis difiere de la media poblacional por un error de muestreo. Esto se debe a las diferencias en la muestra utilizada, la especificación del modelo, los métodos de estimación, entre otros factores (Stanley, 2001). Así que, para poder conocer la varianza del estudio asumiendo efectos aleatorios se tienen que obtener la varianza entre los estudios (τ^2). Para lo que se tiene que (Borenstein et al, 2009):

$$(13) \quad \tau^2 = \frac{Q-df}{C}$$

$$(14) \quad Q = \sum_{i=1}^k W_i Y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^k W_i Y_i)^2}{\sum_{i=1}^k W_i}$$

$$(15) \quad df = k - 1$$

$$(16) \quad C = \sum_{i=1}^k W_i - \frac{(\sum_{i=1}^k W_i)^2}{\sum_{i=1}^k W_i}$$

A diferencia de la ponderación del modelo de efectos fijos, al utilizar efectos aleatorios se incluye la varianza entre-estudios, de manera que la ponderación es la inversa de la suma de la varianza individual de cada estudio más el τ^2 .

$$(17) \quad W_i^* = \frac{1}{v_{Y_i}^2 + \tau^2}$$

$$(18) \quad V_{Y_i}^* = V_{Y_i} + \tau^2$$

La estimación del efecto síntesis se calcula con la nueva ponderación.

$$(19) \quad M^* = \frac{\sum_{i=1}^k W_i^* Y_i}{\sum_{i=1}^k W_i^*}$$

La varianza y desviación del error sintetizado es entonces:

$$(20) \quad V_M^* = \frac{1}{\sum_{i=1}^k W_i^*}$$

$$(21) \quad SE_M^* = \sqrt{V_M^*}$$

Finalmente, el valor Z para la prueba de hipótesis será:

$$(22) \quad Z^* = \frac{M^*}{SE_M^*}$$

De esta forma, lo que se estima a partir de los efectos aleatorios es la media de una distribución de efectos y no el efecto directamente.

En este sentido, se considera la implementación de efectos fijos en el caso en que los estudios sean funcionalmente idénticos y cuando se quiere conocer el efecto en una determinada población y no generalizar para diferentes poblaciones. De lo contrario, si se tiene un grupo de estudios que se han realizado de manera independiente, se considera que no tendrán parecido funcional, por lo que no se debe asumir un efecto común y se debería aplicar los efectos aleatorios.

De esta manera es común utilizar el meta-análisis para poder obtener conclusiones coherentes, útiles y generalizables a partir de literatura de investigación. Ello permite configurar respuestas generalizables a preguntas básicas de política pública (Hunter & Schmit, 2004). Por ejemplo, en términos de política pública, se han aplicado diversos meta-análisis para que el congreso de Estados Unidos y otras instancias tomen decisiones, ya que se considera que el meta-análisis es una metodología que reduce las diferencias en las estimaciones de los estudios y que puede aportar mejores resultados para responder una pregunta de política específica (Hunter & Schmit, 2004).

No obstante, se deben tener en cuenta las desventajas de esta metodología al implementarla. El principal de los problemas que puede tener la estimación a partir del meta-análisis es la posibilidad de sesgo y de datos distorsionados, al estar basada en estudios realizados por autores externos. De igual forma, debe constatar que la información de las publicaciones sea comparable y que las investigaciones sean de calidad comparable (Lipsey & Wilson, 2001).

Así, sobre la base de una revisión de la literatura del costo social del carbono se encontraron 261 observaciones, que se obtuvieron de 37 documentos (véase el cuadro 1). Los valores se catalogaron por autor, fecha de publicación del artículo y fecha para la cual está expresado el costo social del carbono, la metodología empleada para estimar, tasa de preferencia intertemporal, aversión al riesgo, elasticidad, ponderación por equidad (distribución ajustada) y región. Los valores del costo social se homogeneizaron a dólares del 2014.

Cuadro 1
Resumen de las observaciones incluidas en el meta-análisis

	Autor	Fecha	Metodología	Tasa de Preferencia Intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
1	Ackerman & Finlayson	2006	Modelo Integrado	0	.	.	.	.	2006	7,19	1,917
2	Ackerman & Finlayson	2006	Modelo Integrado	0	.	.	.	.	2006	11,98	3,594
3	Ackerman & Stanton	2010	Meta-análisis	2,5	.	.	.	.	2007	40,59	.
4	Ackerman & Stanton	2010	Meta-análisis	3	.	.	.	.	2007	24,35	.
5	Ackerman & Stanton	2010	Meta-análisis	5	.	.	.	.	2007	5,80	.
6	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	0	.	.	.	NO	2003	96,41	.
7	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	0	.	.	.	NO	2003	34,31	.
8	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	0	.	.	.	NO	2003	145,47	.
9	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	0	.	.	.	NO	2003	17,09	.
10	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	0	.	.	.	NO	2003	91,06	.
11	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	0	.	.	.	SI	2003	1431,57	.
12	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	0	.	.	.	SI	2003	351,47	.
13	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	0	.	.	.	SI	2003	2100,72	.
14	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	0	.	.	.	SI	2003	1329,94	.
15	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	1	.	.	.	NO	2003	19,57	.
16	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	1	.	.	.	NO	2003	4,57	.
17	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	1	.	.	.	NO	2003	28,44	.
18	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	1	.	.	.	NO	2003	-2,09	.
19	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	1	.	.	.	NO	2003	16,57	.
20	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	2003	343,25	.
21	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	2003	61,32	.
22	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	2003	457,40	.
23	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	2003	276,06	.
24	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	2003	-3,39	.
25	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	2003	-4,96	.

Cuadro 1 (continuación)

	Autor	Fecha	Metodología	Tasa de preferencia intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
26	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	2003	-3,13	
27	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	2003	-6,91	
28	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	3	.	.	.	.	2003	-4,04	
29	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	2003	-0,91	
30	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	2003	-42,53	
31	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	2003	3,26	
32	Anthoff, Hepburn, & Tol	2009	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	2003	-16,57	2,36
33	Anthoff, Rose, Tol, & Waldhoff	2011	Modelo Integrado	0.1	.	.	.	NO	1995	296,27	2,36
34	Anthoff, Rose, Tol, & Waldhoff	2011	Modelo Integrado	1	.	.	.	NO	1995	48,26	2,36
35	Anthoff, Rose, Tol, & Waldhoff	2011	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	1995	145,75	2,36
36	Anthoff, Rose, Tol, & Waldhoff	2011	Modelo Integrado	1	.	.	.	.	1995	46,35	2,36
37	Anthoff, Rose, Tol, & Waldhoff	2011	Modelo Integrado	1	.	.	.	.	1995	72,48	2,36
38	Anthoff, Rose, Tol, & Waldhoff	2011	Modelo Integrado	1	.	.	.	.	1995	19,27	2,36
39	Anthoff, Rose, Tol, & Waldhoff	2011	Modelo Integrado	1	.	.	.	.	1995	12,89	14,03
40	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1	0.1	.	.	.	2010	407,62	9,59
41	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1	1	.	.	.	2010	112,31	3,33
42	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1	.	.	.	.	2010	10,91	0,42
43	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1	.	.	Australia y Nueva Zelanda	SI	2010	0,45	0,02
44	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1	.	.	América Central	SI	2010	0,48	0,00
45	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1	.	.	Canadá	SI	2010	0,30	0,01

Cuadro 1 (continuación)

	Autor	Fecha	Metodología	Tasa de preferencia intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
43	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1	.	.	Australia y Nueva Zelanda	SI	2010	0,45	0,02
44	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1	.	.	América Central	SI	2010	0,48	0,00
45	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1	.	.	Canadá	SI	2010	0,30	0,01
46	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado				China, Mongolia y Corea del Norte				
47	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1	.	.	Europa del Este	SI	2010	0,69	0,01
48	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1	.	.	Antigua Unión Soviética	SI	2010	18,24	1,34
49	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			Japón y Corea del Sur	SI	2010	-0,20	0,03
50	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			América del sur	SI	2010	0,42	0,01
51	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			África del Norte	SI	2010	8,74	0,99
52	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			Medio Oeste	SI	2010	0,90	0,01
53	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			Sur de Asia	SI	2010	1,37	0,04
54	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			Sudeste Asiático	SI	2010	-1,10	0,26
55	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			Pequeñas Islas	SI	2010	0,02	0,00
56	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			África sub-sahariana	SI	2010	3,14	0,34
57	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			Sur de Asia				
58	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			Sudeste Asiático				
59	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			Pequeñas Islas				
60	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1			África sub-sahariana				
61	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	1,5	3		Estados Unidos	SI	2010	5,90	0,08
62	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	2	0,1	.	.	.	2010	67,58	1,96
63	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	2	1	.	.	.	2010	22,06	0,68
64	Anthoff & Tol	2013	Modelo Integrado	2					2010	0,77	0,11

Cuadro 1 (continuación)

Autor	Fecha	Metodología	Tasa de preferencia intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
65	Anthoff & Tol	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	1995	2,12	.
66	Anthoff & Tol	Modelo Integrado	3	1	.	.	.	2010	10,89	.
67	Azar & Sterner	Modelo Integrado	0	.	.	.	NO	1996	131,60	.
68	Azar & Sterner	Modelo Integrado	0	.	.	.	NO	1996	309,65	.
69	Azar & Sterner	Modelo Integrado	0	.	.	.	SI	1996	247,72	.
70	Azar & Sterner	Modelo Integrado	0	.	.	.	SI	1996	913,45	.
71	Azar & Sterner	Modelo Integrado	0,1	.	.	.	NO	1996	116,12	.
72	Azar & Sterner	Modelo Integrado	0,1	.	.	.	NO	1996	216,75	72
73	Azar & Sterner	Modelo Integrado	0,1	.	.	.	SI	1996	356,09	73
74	Azar & Sterner	Modelo Integrado	0,1	.	.	.	SI	1996	634,77	.
75	Azar & Sterner	Modelo Integrado	1	.	.	.	NO	1996	49,54	.
76	Azar & Sterner	Modelo Integrado	1	.	.	.	NO	1996	51,09	.
77	Azar & Sterner	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	1996	147,08	.
78	Azar & Sterner	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	1996	151,73	.
79	Azar & Sterner	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	1996	20,13	.
80	Azar & Sterner	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	1996	20,13	.
81	Azar & Sterner	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	1996	60,38	.
82	Azar & Sterner	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	1996	60,38	.
83	Clarkson & Deyes	Precio Sombra	1	.	.	.	SI	2000	143,32	.
84	Eyre et al.	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	1990	329,59	277,24
85	Eyre et al.	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	1990	310,20	190,00
86	Eyre et al.	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	1990	116,32	158,98
87	Eyre et al.	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	1990	124,08	75,61
88	Golosov et al.	Equilibrio General	0,1	.	.	.	.	2014	500,00	.
89	Golosov et al.	Equilibrio General	1,5	.	.	.	.	2014	60,00	.

Cuadro 1 (continuación)

Autor	Fecha	Metodología	Tasa de preferencia intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
90	Greenstone et al.	2013	Meta-analysis	2,5	.	.	.	2007	40,59	.
91	Greenstone et al.	2013	Meta-analysis	3	.	.	.	2010	22,86	.
92	Greenstone et al.	2013	Meta-analysis	5	.	.	.	2010	5,44	.
93	Guo et al.	2006	Modelo Integrado	0	.	.	.	1995	92,39	.
94	Guo et al.	2006	Modelo Integrado	0	.	.	.	2005	113,09	.
95	Guo et al.	2006	Modelo Integrado	1	.	.	.	1995	17,52	.
96	Guo et al.	2006	Modelo Integrado	1	.	.	.	2005	20,71	.
97	Guo et al.	2006	Modelo Integrado	3	.	.	.	1995	-3,66	.
98	Guo et al.	2006	Modelo Integrado	3	.	.	.	2005	-3,47	.
99	Hope & Maul	1996	Modelo Integrado	2	.	.	NO	1996	10,84	.
100	Hope & Maul	1996	Modelo Integrado	2	.	.	NO	1996	29,42	.
101	Hope & Maul	1996	Modelo Integrado	5	.	.	NO	1996	77,41	.
102	Hope & Maul	1996	Modelo Integrado	5	.	.	NO	1996	418,02	.
103	Hope, & Newbey	2006	Modelo Integrado	1,5	1	.	SI	2006	79,07	.
104	Hope, & Newbey	2006	Modelo Integrado	3	1	.	SI	2006	51,52	13,06
105	Hope, & Newbey	2006	Modelo Integrado	4,5	1	.	SI	2006	61,10	15,24
106	Hope	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	.	2005	210,84	210,84
107	Hope	2008	Modelo Integrado	1	.	-1	NO	2000	97,43	.
108	Hope	2008	Modelo Integrado	1	.	-0,5	NO	2000	289,47	.
109	Hope	2008	Modelo Integrado	1	.	0	NO	2000	1150,80	.
110	Hope	2011	Modelo Integrado	1,3	.	.	.	2005	124,02	324,46
111	Hope	2008	Modelo Integrado	2	.	-1	NO	2000	35,30	.
112	Hope	2008	Modelo Integrado	2	.	-0,5	NO	2000	87,55	.
113	Hope	2008	Modelo Integrado	2	.	0	NO	2000	285,23	.
114	Hope	2011	Modelo Integrado	2	.	.	.	2005	37,21	251,83

Cuadro 1 (Continuación)

	Autor	Fecha	Metodología	Tasa de preferencia intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
115	<i>Hope</i>	2008	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	2000	81,90	.
116	<i>Hope</i>	2008	Modelo Integrado	3	.	-1	.	SI	2000	110,14	.
117	<i>Hope</i>	2008	Modelo Integrado	3	.	-0.5	.	SI	2000	91,78	.
118	<i>Interagency Working Group</i>	2013	Modelo Integrado	2,5	.	.	.	.	2007	60,30	.
119	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	2,5	.	.	.	.	2007	40,71	.
120	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	2,5	.	.	.	.	2007	50,45	.
121	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	2,5	.	.	.	.	2007	59,03	.
122	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	2,5	.	.	.	.	2007	16,24	.
123	<i>Interagency Working Group</i>	2013	Modelo Integrado	3	.	.	.	.	2007	38,27	.
124	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	3	.	.	.	.	2007	24,82	.
125	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	3	.	.	.	.	2007	34,33	.
126	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	3	.	.	.	.	2007	36,30	.
127	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	3	.	.	.	.	2007	7,31	.
128	<i>Interagency Working Group</i>	2013	Modelo Integrado	5	.	.	.	.	2007	12,76	.
129	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	5	.	.	.	.	2007	5,45	.
130	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	5	.	.	.	.	2007	11,83	.

Cuadro 1 (Continuación)

	Autor	Fecha	Metodología	Tasa de preferencia intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
131	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	5	.	.	.	.	2007	8,58	.
132	<i>Interagency Working Group</i>	2010	Modelo Integrado	5	.	.	.	.	2007	-1,74	.
133	<i>Madisson</i>	1995	Equilibrio General	5	.	.	.	NO	2000	23,78	.
134	<i>Newell & Pizer</i>	2003	Modelo estocástico	2	.	.	.	NO	1989	44,13	.
135	<i>Newell & Pizer</i>	2003	Modelo estocástico	2	.	.	.	NO	1989	68,74	135
136	<i>Newell & Pizer</i>	2003	Modelo estocástico	2	.	.	.	NO	1989	47,39	136
137	<i>Newell & Pizer</i>	2003	Modelo estocástico	4	.	.	.	NO	1989	11,59	137
138	<i>Newell & Pizer</i>	2003	Modelo estocástico	4	.	.	.	NO	1989	21,15	138
139	<i>Newell & Pizer</i>	2003	Modelo estocástico	4	.	.	.	NO	1989	13,22	139
140	<i>Newell & Pizer</i>	2003	Modelo estocástico	7	.	.	.	NO	1989	3,05	140
141	<i>Newell & Pizer</i>	2003	Modelo estocástico	7	.	.	.	NO	1989	5,90	141
142	<i>Newell & Pizer</i>	2003	Modelo estocástico	7	.	.	.	NO	1989	3,66	142
143	<i>Nordhaus & Boyer</i>	2000	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	2000	8,33	.
144	<i>Nordhaus & Yang</i>	1996	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	2000	8,75	.
145	<i>Nordhaus</i>	2011	Modelo Integrado	0	.	1	.	SI	2005	1162,10	.
146	<i>Nordhaus</i>	2011	Modelo Integrado	0	.	1,5	.	SI	2005	318,74	.
147	<i>Nordhaus</i>	2011	Modelo Integrado	0	.	2	.	SI	2005	94,26	.
148	<i>Nordhaus</i>	2011	Modelo Integrado	0,01	.	0	.	SI	2005	1618,50	.
149	<i>Nordhaus</i>	2011	Modelo Integrado	0,01	.	1	.	SI	2005	255,49	.
150	<i>Nordhaus</i>	2011	Modelo Integrado	0,01	.	1,5	.	SI	2005	93,02	.
151	<i>Nordhaus</i>	2011	Modelo Integrado	0,01	.	2	.	SI	2005	37,21	.
152	<i>Nordhaus</i>	2011	Modelo Integrado	0,015	.	0	.	SI	2005	767,70	.
153	<i>Nordhaus</i>	2011	Modelo Integrado	0,015	.	1	.	SI	2005	147,59	153

Cuadro 1 (continuación)

Autor	Fecha	Metodología	Tasa de preferencia intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
154	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,015	.	1,5	.	2005	59,53	24,00
155	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,015	.	2	SI	2005	27,29	.
156	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	0,015	.	.	.	2005	23,07	.
157	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,03	.	0	SI	2005	156,27	.
158	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,03	.	1	SI	2005	45,89	.
159	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,03	.	1,5	SI	2005	23,56	.
160	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,03	.	2	SI	2005	12,40	.
161	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	Estados Unidos	.	13,56	.
162	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	Unión Europea	.	9,59	.
163	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	Japón	.	2,57	.
164	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	Rusia	.	1,55	.
165	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	Eurasia	.	1,51	.
166	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	China	.	35,89	.
167	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	India	.	24,94	.
168	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	Medio Oeste	.	11,14	168
169	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	África	.	36,74	169
170	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	América Latina	.	8,52	170
171	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	Otros países en desarrollo	.	32,80	171
172	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	0,1	.	.	.	.	171,15	172
173	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	1,5	.	.	Estados Unidos	2005	4,46	173
174	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	1,5	.	.	Unión Europea	2005	5,10	.
175	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	1,5	.	.	Japón	2005	0,97	.
176	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	1,5	.	.	Rusia	2005	0,63	.
177	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	1,5	.	.	Eurasia	2005	0,60	.

Cuadro 1 (continuación)

	Autor	Fecha	Metodología	Tasa de preferencia intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
178	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	1,5	.	.	China	.	2005	12,90	.
179	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	1,5	.	.	India	.	2005	9,90	.
180	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	1,5	.	.	Medio Oeste	.	2005	4,17	.
181	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	1,5	.	.	África	.	2005	9,71	.
182	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	1,5	.	.	América Latina	.	2005	3,22	182
183	Nordhaus	2011	Modelo Integrado	1,5	.	.	Otros países en desarrollo	.		7,80	183
184	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	1,5	.	.	Estados Unidos	.	2005	2,41	184
185	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	1,5	.	.	Unión Europea	.	2005	2,88	185
186	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	1,5	.	.	Japón	.	2005	0,53	186
187	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	1,5	.	.	Rusia	.	2005	0,22	187
188	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	1,5	.	.	Asia	.	2005	0,20	188
189	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	1,5	.	.	China	.	2005	3,75	189
190	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	1,5	.	.	India	.	2005	2,74	190
191	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	1,5	.	.	Medio Oeste	.	2005	2,34	191
192	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	1,5	.	.	África	.	2005	2,59	192
193	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	1,5	.	.	América Latina	.	2005	1,61	193
194	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	1,5	.	.	otro	.	2005	2,84	194
195	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	3	.	.	.	.	2010	38,45	195
196	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	3,5	.	.	.	.	2005	23,07	196
197	Nordhaus	2014	Modelo Integrado	3,5	.	.	.	.	2005	7,94	197
198	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	.	.	2010	33,97	198
199	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	Estados Unidos	.	2010	5,20	199
200	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	Unión Europea	.	2010	5,22	.
201	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	Japón	.	2010	1,16	.
202	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	Rusia	.	2010	0,99	202

Cuadro 1 (continuación)

	Autor	Fecha	Metodología	Tasa de preferencia intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
203	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	Asia	.	2010	1,70	203
204	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	China	.	2010	7,20	204
205	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	India	.	2010	3,19	205
206	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	Medio Oeste	.	2010	2,35	206
207	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	África	.	2010	1,12	207
208	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	América Latina	.	2010	2,04	208
209	Nordhaus	2016	Modelo Integrado	5	.	.	otro	.	2010	2,72	209
210	Pearce	2003	Meta-análisis	1	.	.	.	SI	2000	33,18	210
211	Peck & Teisberg	1993	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	1993	16,89	211
212	Plambeck & Hope	1996	Modelo Integrado	0	.	.	.	NO	1996	681,22	212
213	Plambeck & Hope	1996	Modelo Integrado	2	.	.	.	NO	1996	71,22	213
214	Plambeck & Hope	1996	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	1996	32,51	214
215	Reilly & Richards	1993	Equilibrio General	2	.	.	.	NO	1993	23,31	215
216	Reilly & Richards	1993	Equilibrio General	5	.	.	.	NO	1993	6,59	216
217	Reilly & Richards	1993	Equilibrio General	5	.	.	.	NO	1993	9,80	217
218	Reilly & Richards	1993	Equilibrio General	8	.	.	.	NO	1993	3,72	.
219	Roughgarden & Schneider	1999	Modelo estocástico	3	.	.	.	NO	1990	78,32	.
220	Schauer	1995	Precio Sombra	5	.	.	.	NO	2004	10,58	27,02
221	Schauer	1995	Precio Sombra	5	.	.	.	NO	2004	143,39	190,93
222	Shindell.	2013	Modelo Integrado	1,4	.	.	.	.	2007	162,36	.

Cuadro 1 (Continuación)

	Autor	Fecha	Metodología	Tasa de preferencia intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
223	Shindell.	2013	Modelo Integrado	3	.	.	.	.	2007	57,98	.
224	Shindell.	2013	Modelo Integrado	5	.	.	.	.	2007	12,76	.
225	Tol	2002	Modelo Integrado	0	.	.	.	NO	2000	28,10	.
226	Tol	2002	Modelo Integrado	0	.	.	.	SI	2000	22,73	.
227	Tol	2002	Modelo Integrado	1	.	.	.	NO	2000	5,37	.
228	Tol	2002	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	2000	9,32	.
229	Tol	2002	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	2000	-9,32	.
230	Tol	2002	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	2000	-0,71	.
231	Tol & Downing	2000	Modelo Integrado	0	.	.	.	SI	2000	154,62	.
232	Tol & Downing	2000	Modelo Integrado	0	.	.	.	NO	2000	21,32	20,90
233	Tol & Downing	2000	Modelo Integrado	0	.	.	.	SI	2000	105,20	.
234	Tol & Downing	2000	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	2000	104,21	.
235	Tol & Downing	2000	Modelo Integrado	1	.	.	.	NO	2000	12,57	10,73
236	Tol & Downing	2000	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	2000	64,67	.
237	Tol & Downing	2000	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	2000	52,25	.
238	Tol & Downing	2000	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	2000	5,37	3,53
239	Tol & Downing	2000	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	2000	23,02	.
240	Tol	2009	Modelo Integrado	0	.	.	.	NO	2010	252,59	472,510
241	Tol	2009	Modelo Integrado	0	.	.	.	SI	2010	152,42	168,753
242	Tol	2010	Modelo Integrado	0	.	.	.	SI	2010	302,67	283,070
243	Tol	2009	Modelo Integrado	1	.	.	.	NO	2010	92,54	154,600
244	Tol	2009	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	2010	130,65	161,132
245	Tol	2010	Modelo Integrado	1	.	.	.	SI	2010	93,63	105,607
246	Tol	2009	Modelo Integrado	3	.	.	.	NO	2010	19,60	21,775
247	Tol	2009	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	2010	54,44	66,413

Cuadro 1 (conclusión)

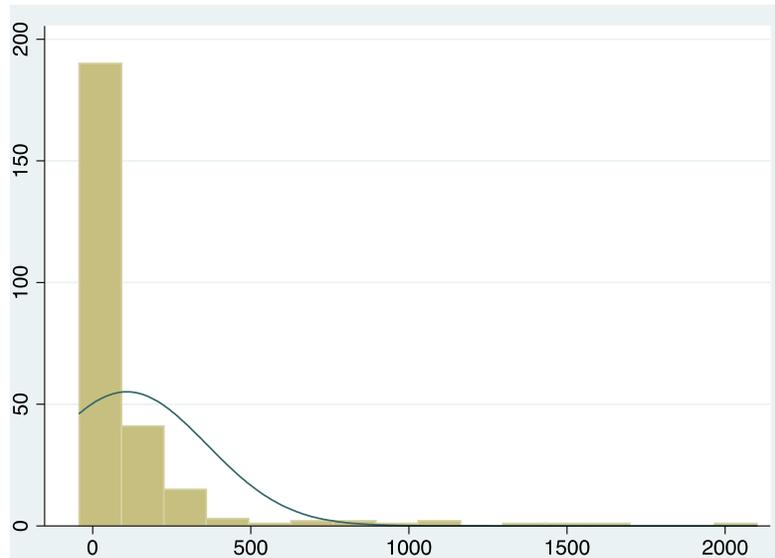
	Autor	Fecha	Metodología	Tasa de preferencia intertemporal	Aversión al riesgo	Elasticidad	Región	Distribución Ajustada	Año en el que está expresado el precio	Costo a precios de 2014	Desviación a precios de 2014
248	Tol	2010	Modelo Integrado	3	.	.	.	SI	2010	20,69	19,597
249	Tol	2005	Modelo estocástico	.	.	.	.	.	2005	120,30	251,767
250	Tol	2005	Modelo estocástico	.	.	.	.	SI	2005	151,31	396,875
251	Tol	2005	Modelo estocástico	.	.	.	.	SI	2005	106,66	308,818
252	Tol	2005	Modelo estocástico	.	.	.	.	.	2005	6,20	.
253	Tol	2009	Meta-analisis	.	.	.	.	NO	2010	114,32	264,562
254	Tol	2009	Meta-analisis	.	.	.	.	.	2010	31,57	.
255	Tol	2009	Meta-analisis	.	.	.	.	SI	2010	164,40	295,046
256	Tol	2009	Meta-analisis	.	.	.	.	.	2010	44,64	.
257	Tol	2010	Meta-analisis	.	.	.	.	SI	2010	194,88	321,176
258	van den Bijgaart, Gerlagh & Liski.	2016	Equilibrio General	0.1	.	.	.	.	2016	894,87	688,36
259	van den Bijgaart, Gerlagh & Liski.	2016	Equilibrio General	1	.	.	.	.	2016	107,44	82,64
260	van den Bijgaart, Gerlagh & Liski.	2016	Equilibrio General	2	.	.	.	.	2016	55,13	42,41
261	van den Bijgaart, Gerlagh & Liski.	2016	Equilibrio General	3	.	.	.	.	2016	37,05	28,50

Fuente: Elaboración propia.

La metodología más empleada para obtener un CSC son los Modelos de Análisis Integrados (MAI) con 84% de las observaciones, 5.8% provienen de modelos estocásticos y 5.04% de meta-análisis o síntesis de la literatura. Sólo 13 observaciones reportan valores de aversión al riesgo, y sólo 23 incluyeron valores de elasticidad, 31% de las observaciones consideraron las ponderaciones por equidad. Únicamente 60 estudios especificaron el costo social para una región específica. Sólo 64 observaciones presentaron desviación estándar, para el resto de las observaciones se realizó una imputación múltiple, asumiendo una distribución normal.

El conjunto de observaciones del CSC presenta un promedio de 46.79 dólares con una desviación estándar de 62.68 dólares, sin embargos la distribución es sesgada con una alta concentración a valores cercanos a cero y pocas observaciones con valores extremos (véase el gráfico 5). El 5% del percentil cae en valores negativos, y arriba del 95% son valores superiores a 418 dólares la tonelada.

Gráfico 5
Distribución de las observaciones del CSC
(Frecuencia)

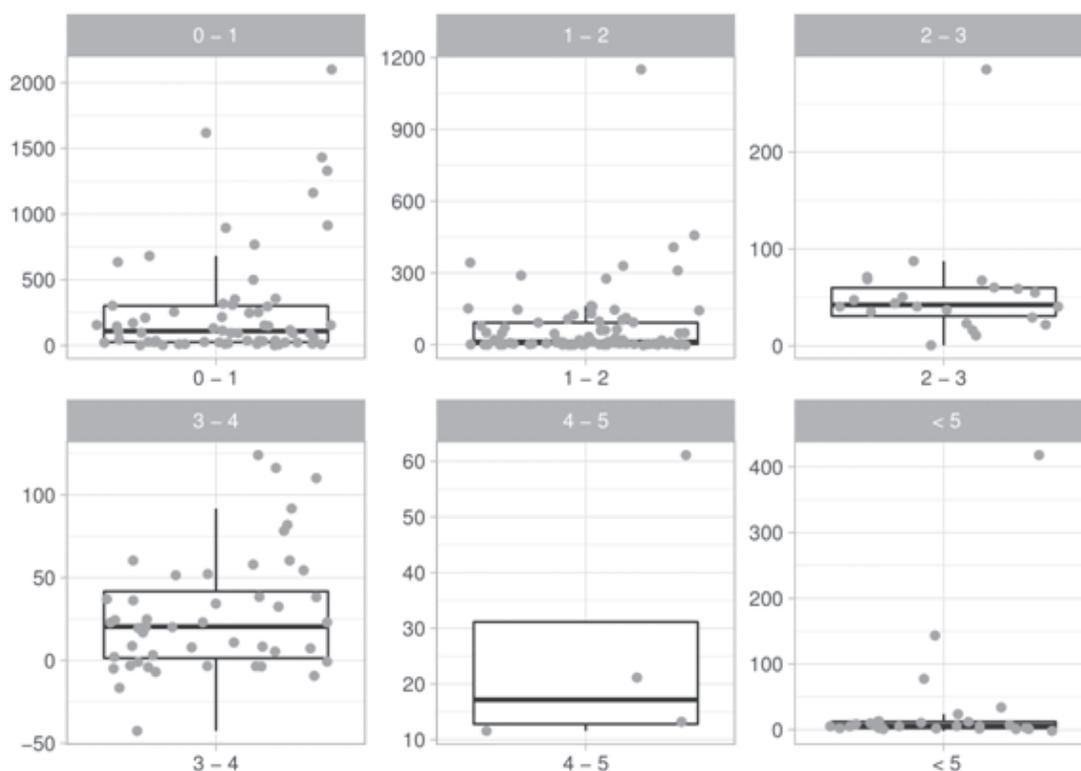


Fuente: Elaboración propia

La tasa de descuento que reportan los estudios va desde 0 a 8%, por ello se agruparon las tasas de descuento en cuatro grupos: a) tasa cero que corresponde a valores de 0 a 0.03%; b) tasa uno que agrupa valores de 1 y 1.5%; c) tasa dos que agrupa de 2 a 3.5%; y d) tasa 4, agrupa valores de 4% en adelante. De esta manera se observa que los valores promedio, a pesar de la dispersión, presenta una tendencia a la baja conforme la tasa aumenta (véase el gráfico 6). El promedio de la tasa cero es de 282.89 dólares por tonelada, y para la tasa 4 es de 26.87.

Gráfico 6
Costo social del carbono: Distribución por tasa de descuento

(Dólares por tonelada)



Fuente: Elaboración propia

Las estimaciones de los meta-análisis en el conjunto de los datos y en grupos de tasas de descuento se realizaron eliminando los valores extremos en ambas colas de la distribución. Los resultados de las pruebas de heterogeneidad del meta-análisis se presentan en el cuadro 2, donde τ^2 representa la varianza entre los estudios asociada a la estimación y utilizando el método de efectos aleatorios, Q-Stat representa el estadístico Q que busca identificar la presencia de evidencia estadísticamente significativa de heterogeneidad entre la magnitud de los efectos incluidos en el meta-análisis. Por último, I² indica la proporción de la variación observada en la magnitud de los efectos atribuible a la heterogeneidad en los estudios, esto es, la proporción de la varianza que no corresponde al error de muestreo, indican que el estadístico Q rechaza la hipótesis nula de homogeneidad en todos los casos, a excepción de la tasa de descuento 3. De este modo, se observa que el costo social del carbono promedio considerando todos los datos es de 25.83 dólares por tonelada, con rangos muy estrechos (24.99 a 26.67). En cuanto a la dispersión se observa que en la tasa 0, es donde existe más dispersión.

Los resultados del meta-análisis por tasa de descuento no corresponde al orden del promedio sin considerar el meta-análisis, debido a la dispersión de los datos y la mediana de las distribuciones.

De este modo, los resultados obtenidos indican que el CSC derivado del meta-análisis es de 25.83 dólares por tonelada de carbono. Destaca, sin embargo, que este valor es sensible a la tasa de descuento utilizada, por ejemplo, el valor del CSC, con tasas de descuento cercanas a cero, es de 100 dólares la tonelada de carbono mientras que, con una tasa de descuento superior al 3%, se obtiene

un CSC de 6 dólares por tonelada de carbono. Asimismo debe considerarse que estas estimaciones excluyen, normalmente, los potenciales efectos de eventos catastróficos extremos. Ello resulta particularmente relevante a incluir en América Latina y el Caribe.

Cuadro 2
Resultados de meta-análisis: efectos aleatorios

Parámetro	Total	Tasa 0	Tasa 1	Tasa 2	Tasa 3
M	25,83	100,63	16,47	30,14	6,29
Intervalo de confianza	[24,99-26,67]	[42,96-158,30]	[15,72-17,22]	[17,15-43,18]	[4,08-8,50]
Prueba de heterogeneidad					
τ^2	3,25***	0,0003***	1,71***	421,7***	0,00
Q-stat	37 477***	9 914***	19 520***	2 131***	14,03
I ²	0,99***	0,99***	0,99***	0,97***	0,00
N	232	62	75	58	31

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los resultados de las estimaciones del meta-análisis.

Nota: *** denota rechazo de la hipótesis nula con un 99% de confianza. Q-Stat se refiere al estadístico Q de Cochran, (1954). H0: Todos los estudios en la muestra comparten una media poblacional común.

IV. Conclusiones y comentarios generales

El costo social del carbono es un concepto fundamental en el análisis de la economía del cambio climático. Esto es, el cambio climático puede entenderse como una externalidad negativa global (Stern, 2007) que por tanto requiere para su solución la aplicación de diversas políticas públicas. Una instrumentación eficiente económicamente de estas políticas públicas se basa en identificar sus costos y beneficios potenciales lo que implica conocer, con un alto grado de incertidumbre, los potenciales costos económicos, sociales y ambientales del cambio climático. Estos daños, en valores monetarios, del cambio climático permiten identificar el costo social del carbono. Así, el costo social el carbono corresponde a las consecuencias adicionales del cambio climático en un escenario de mayores emisiones de gases de efecto invernadero en referencia a un escenario base (Hoel, 2013 y Gerlagh y Liski, 2012). De este modo, el CSC estima el costo social de una tonelada adicional de CO₂ en la atmósfera.

Las estimaciones disponibles del CSC son muy variadas y heterogéneas, incluso existe una multiplicidad de estimaciones derivadas de los mismos modelos aplicando distintos supuestos.

En este contexto, se construyó un resumen a de la literatura, utilizando algunos métodos derivados del meta-análisis, que permiten presentar una síntesis ordenada de la información disponible. Los resultados obtenidos indican una media del CSS de 25,83 dólares por tonelada de CO₂ con una desviación de 0.84. Destaca, sin embargo, que este valor es sensible a la tasa de descuento utilizada, por ejemplo, el valor del CSC, con tasas de descuento cercanas a cero, es de 100 dólares la tonelada de carbono mientras que, con una tasa de descuento superior al 3%, se obtiene un CSC de 6 dólares por tonelada de carbono. Debe asimismo de considerarse que estas estimaciones excluyen, normalmente, los potenciales efectos de eventos catastróficos extremos.

Estos resultados sugieren un valor potencial a utilizar en los análisis de costo beneficio o de eficiencia económica e incluso un valor aproximado sobre el valor de un impuesto óptimo. Este valor puede considerarse conservador ya que es más probable que se generen más noticias negativas que positivas en el futuro atendiendo a los procesos de retroalimentación climático y a la identificación de procesos socioeconómicos que aún no han sido plenamente analizados como migraciones.

De este modo, el CSC estimado de 25.83 debe de matizarse atendiendo a varios factores:

- El nivel de incertidumbre de estas estimaciones. Esto es, los resultados obtenidos están sujetos a diversas incertidumbres que pueden inducir a modificaciones substanciales en

los resultados finales. En este sentido, el valor específico del CSC debe tomarse como un valor indicativo sujeto a revisiones periódicas.

- El precio social del carbono que se desprende de la síntesis de la literatura es insuficiente para resolver el desafío del cambio climático²⁸ (Ackerman y Staton, 2011, CEPAL, 2015). Esto es, en particular, en los países en desarrollo existe una elasticidad precio de la demanda general de energía y de las gasolinas inelástica que sugiere la escasa presencia de bienes y servicios sustitutos (Galindo et al. 2016). En este escenario es difícil considerar que el alza de los precios de los combustibles conduzca a la adecuada sustitución de bienes y servicios con alto contenido de carbono. Exista además consideraciones de equidad en los países en desarrollo ya que un alza generalizada del precio de los combustibles tiene efectos potenciales regresivos sobre la distribución del ingreso y de efectos potenciales negativos en la competitividad internacional. De este modo, una posible propuesta de política pública puede incluir la conformación de corredores de CSC, con precios diferenciados, que permitan preservar la competitividad regional y minimicen los efectos negativos en el bienestar. Ello, sin embargo, se contrapone con el argumento económico de que la reducción de emisiones es costo efectiva en el caso en que los costos marginales de las reducciones son iguales en todos países ya que así es posible alcanzar reducciones de emisiones al menor costo posible (Nordhaus, 2007, Hope, 2006).
- Existe actualmente una tendencia a utilizar en los análisis de costo beneficio un precio sombra del carbono derivado de los costos marginales de abatimiento en vez de considerar el CSC (Watkins, et al 2006).

En todo caso, desde la óptica de la política pública, identificar un CSC en el largo plazo ofrece una certidumbre que se convierte en un mecanismo fundamental para la innovación, los procesos de sustitución de bienes y servicios intensivos en carbono y para preservar los niveles de ahorro e inversión futuros²⁹ (Stern, 2007 y Gerlagh y Liski, 2013). Así, por ejemplo, un CSC es un mecanismo fundamental para los sectores como la energía, el transporte, los bosques y en general para las políticas públicas referidas al cambio climático (Pearce, 2003). Estos proceso, además, se refuerzan; por ejemplo, las políticas públicas para detener la deforestación o el eliminar los subsidios a los combustibles fósiles reducen los costos de la mitigación substancialmente (Maddison, (1995).

De este modo, identificar y establecer un CSC resulta un instrumento particularmente útil en la construcción de políticas públicas referidas al cambio climático y al desarrollo sostenible. Ello sin embargo, debe incluir el principio precautorio, el reconocimiento del nivel de incertidumbre asociado, los análisis de sensibilidad respectivos y el uso de análisis complementarios como las curvas de costo de abatimiento (MAC) (Watkins, et al, 2006).

²⁸ Gerlagh y Liski (2013) argumentan, con un modelo de equilibrio general computable, el precio óptimo al carbono es muy distinto de los costos estimados de la externalidad negativa.

²⁹ Incluyendo el aumento paulatino de costos de extracción para recursos naturales no renovables (Hoel, 2009).

Bibliografía

- Ackerman y Staton (2011), Climate risks and carbon prices, Revising the social costs of carbon economics.
- Ackerman, F. y Finlayson, I. (2006). The economics of inaction on climate change: a sensitivity analysis. *Climate Polity*, 6, 509-526.
- Anthoff, D., Rose, S., Tol, R. y Waldhoff, S. (2011). The time evolution of the social cost of carbon: an application of FUND. *Economics eJournal*, 44, 1-21.
- Anthoff, D., Hepburn, C. y Tol, R. (2009). Equity weighting and the marginal damage costs of climate change. *Ecological Economics*, 68, 836-849.
- Arrow, K. J., (2007), Global climate change: A challenge to policy, *The Economist's Voice*, vol. 4 (3), Article 2.
- Ayres, R. U. y J. Walter (1991): 'The Greenhouse Effect: Damages, Costs and Abatement', *Environmental and Resources Economics* 1, 237-270.
- Borenstein, M., Hedges, L., Higgins, J. y Rothstein, H. (2009). *Introduction to Meta-Analysis*. United Kingdom: TJ International, Padstow, Cornwall. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Clarke L, Edmonds J, Krey V, Richels R, Rose S, Tavoni M (2009) International climate policy architectures: overview of the EMF 22 International Scenarios. *Energy Econ* 31(Supplement 2): S64-S81
- Clarkson, R. y Deyes, K. (2002). Estimating the social cost of carbon emissions. Environment protection economics division, department of environment. Londres.
- Cline, W. R., (2004). "Climate Change." In Lomborg, ed., pp. 13-43.
- _____ (1992): *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington DC.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], (2015), *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: paradojas y desafíos del desarrollo sostenible*, UN
- Dasgupta, P. (2008). "Discounting climate change." *Journal of Risk and Uncertainty* 37:141-169.
- Dasgupta, P., K. G. Mäler, and S. Barrett (1999). "Intergenerational Equity, Social Discount Rates, and Global Warming." In *Discounting and Intergenerational Equity*, Portney, P. R. and J. P. Weyant (eds.), Resources for the Future, Washington, DC, pp 51-78.
- DeCanio, S. J. y P. Niemann (2006). "Equity effects of alternative assignments of global environmental rights." *Ecolog. Econ.* 56: 546-559.
- Eyre, N., Downing, T., Hoekstra, R. y Rennings, K. (1999). *Externe, externalities of Energy*. Belgina: Comisión Europea.
- Fankhauser, S. (1994), 'The Economic Costs of Global Warming Damage: A Survey', *Global Environmental Change*, 4, (4), 301-309.
- Galindo, L.M., Beltran A. y Caballero K, (2017). Potential Consequences of a CO2 Aviation Tax In México on the Demand for Tourism, working paper

- Gerlagh, R. y Liski, M. (2013) Carbon Prices for the Next Thousand Years. CESifo Working Paper Series 3855, CESifo Group Munich
- Glass, G., McGaw, B. y Smith, M. (1981), meta-Analysis in Social Research, Newsbury Park, CA:Sage.
- Gosolov, M., Hassler, J., Krusell, P. y Tsyvinski, A. (2014). Optimal taxes of fossil fuel in general equilibrium. *Econometrica*, 82 (1), 41-88.
- Greenstone, M., Kopits, E. y Wolverton, A. (2013). Developing a social cost of carbon for US regulatory analysis: a methodology and interpretation. *Review of environmental economics and policy*, 7 (1), 23-46.
- Guo, J., Hepburn, C., Tol, R. & Anthoff, D. (2006). Discounting and the social cost of carbon: a closer look at uncertainty. *Environmental science & policy*, 9, 205-216.
- Ha-Duong, Minh y Treich, Nicolas (2004) Risk Aversion, Intergenerational Equity and Climate Change. *Environmental and Resource Economics*, 28 (2). pp. 195-207
- Hanley, N. (2001), 'Cost-benefit analysis and environmental policy making', *Environment and Planning C*, 19, 103-18.
- Hall, R., y C. Jones. 2007. The value of life and the rise in health spending. *Quarterly Journal of Economics* 122 (1): 39-72.
- Hersch, J., Viscusi, W.K. (2006). "The generational divide in support for environmental policies: European evidence", *Climatic Change* 77, 121-136.
- Hoel, M. (2009), "Bush meets Hotelling: Effects of improved renewable energy technology on greenhouse gas emissions." CESifo Working Paper 2492.
- Hope, C. (2011). The social cost of CO₂ from PAGE09 model. *Economics eJournal*, 39, 1-30.
- _____ (2008). Discount rates, equity weights and the social cost of carbon. *Energy economics*, 30, 1011-1019.
- Hope, C. y Newbery, D. (2006). Calculating the social cost of carbon. University of Cambridge, 1-28.
- Howarth, R.B., Norgaard, R.B., 1992. Environmental valuation under sustainable development. *American Economic Review* 82 (2), 473-477.
- Hunter, J. y Schmit, F. (2004). *Methods of Meta-Analysis: correcting error and bias in research findings* (2 Ed.). California: SAGE publications.
- International Carbon Action Partnership [ICAP], (2017) *Emission Trading Worldwide. Status Report 2017*. Berlin: International Carbon Action Partnership,
- Intergovernmental Panel on Climate Change, [IPCC]. (2007). *Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. New York: Cambridge University Press.
- Joos, F., R. Meyer, M. Bruno, y M. Leuenberger (1999), The variability in the carbon sinks as reconstructed for the past 1000 years, *Geophysical Research Letters*, 26, 1437 – 1440.
- Kuik, O., Buchner, B., Catenacci, M., Gloria, A., Karakaya, E. and Tol, R. S. J. (2008), Methodological aspects of recent climate change damage cost studies, *The Integrated Assessment Journal* 8 [1] 19-40.
- Lipsey, M.W. y Wilson, D.B. (2001), *Practical Meta-Analysis*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Maddison, D. (1995). A cost-benefit analysis of slowing climate change. *Energy policy*, 23 (4/5), 337-346.
- Mendelsohn, R. y A. Dinar (2009), "Climate Change and Agriculture: An Economic Analysis of Global Impacts, Adaptation, and Distributional Effects", Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing.
- Mendelsohn, R. y Seo, N. (2007) An integrated farm model of crops and livestock: Modeling Latin American agricultural impacts and adaptation to climate change World Bank Policy Research Working Paper 4161 (World Bank: Washington DC).
- Nordhaus, W. (2016). Revisiting the social cost of carbon. *PNAS*, 114 (7), 1518-1523.
- _____ (2014). Estimates of the social cost of carbon: concepts and results from DICE-2013R model and alternative approaches. *Journal of the association of environmental and resource economists*, 1, 273-312.
- _____ (2011). Estimates of the social cost of carbon: background and results from the RICE-2011 model. Cowles foundation for research in economics, Yale University, 1826, 1-48.
- _____ (2009). An analysis of the dismal theorem. Cowles Foundation discussion paper no. 1686. January.
- _____ (2008), *A Question of Balance -- Weighing the Options on Global Warming Policies* Yale University Press, New Haven.
- _____ (2007) A review of the stern review on the economics of climate change. *J Econ Lit* XLV:686-702

- Nordhaus, W. y Boyer, J. (2000). *Warming the world*. Estados Unidos: Massachusetts Institute of Technology.
- _____. "Model of the Economics of Global Warming (Cowles Foundation discussion paper no. 1009)"
- _____. (1991): To slow or not to slow; The economics of the greenhouse effect, *Economic Journal* 101 (407), pp. 920-937.
- Pearce, D. (1995): 'Blueprint 4 : Capturing Global Environmental Value', Earthscan, London.
- _____. *Policy* 19(3), 362–384.
- Pigou, A. C., (1920), *The economics of welfare*, vol. 4th, Macmillan, London.
- Plambeck, E. y Hope, C. (1996). An updated valuation of the impacts of global warming. *Energy policy*, 24 (9), 783-793.
- Schauer, M. (1995). Estimation of the greenhouse gas externality with uncertainty. *Environmental and resource economics*, 5, 71-82.
- Schlenker, W., W. M. Hanemann, and A. C. Fisher. 2005. Will U.S. agriculture really benefit from global warming? Accounting for irrigation in the hedonic approach. *American Economic Review* 95:395–406.
- Stanley, T.D. (2001), Wheat from chaff: Meta-analysis as quantitative literature review, *Journal of Economic Perspectives*, 15(3), 131-50.
- Stern, N. (2013), The structure of economic modelling of the potential impacts of climate change: grafting gross underestimation of risk onto already narrow science models. *Journal of Economic Literature* 51 (3): 1–22.
- _____. Stern, N. (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge. University Press
- Szpiro, G. 1986. Measuring risk aversion: An alternative approach. *Review of Economics and Statistics* 68 (1): 156–59.
- Tol, R. (2010). The economic impact of climate change. *Perspektiven der Wirtschaftspolitik*, 1 (1), 13-37.
- _____. (2009). The economic effects of climate change. *Journal of economic perspectives*, 23 (2), 29-51.
- _____. (2005). The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties. *Energy policy*, 33, 2064-2074.
- Tol, R. y Downing, T. (2000). *The marginal costs of climate changing emissions*. Amsterdam: Institute for Environmental Studies.
- van der Berg, J. C. J. M., Botzen, W. J. W., (2014). A lower bound to the social cost of CO2 emissions. *Nature Climate Change* 4, 253-258.
- van den Bijaart, I., Gerlagh, R. y Liski, M. (2016). A simple formula for the social cost of carbon. *Journal of environmental and management*, 77, 75-94.
- Watkiss, P. y Downing, T. 2008. "The social cost of carbon: Valuation estimates and their use in UK policy", *The Integrated Assessment Journal*, 8(1): 85-105.
- Watkiss, P., Anthoff, D., Downing, T., Hepburn, C., Hope, C., Hunt, A. y Tol, R. S. J. (2006), *The social costs of carbon (SCC) review—methodological approaches for using SCC estimates in policy assessment*, Final report to DEFRA.
- Weitzman, M. L. 2007. "Subjective expectations and asset-return puzzles." *Amer. Econ. Rev.* 97:1102–1130.
- Weitzman, M. L. 2009. "On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change." *The Review of Economics and Statistics* 91:1-19.
- _____. 1998. Why the far-distant future should be discounted at its lowest possible rate. *Journal of Environmental Economics and Management* 36(3), 201–208.
- World Bank Group, y Ecofys (2017), *State and Trends of Carbon Pricing*.



El principal objetivo de este estudio es ofrecer una síntesis de los valores del costo social del carbono (CSC) de cara a la formulación de políticas públicas referidas al cambio climático en América Latina. El CSC identifica el costo económico que ocasiona una tonelada adicional de CO₂ emitida a la atmósfera para las actividades económicas, el bienestar social y los ecosistemas. En la síntesis de la literatura de los valores del CSC se emplearon diversas técnicas de metaanálisis en las que se identificó un costo social del carbono de 25,83 dólares por tonelada.