



Aproximación al costo social de las emisiones de carbono en Colombia

Ana María Zapata Cortínez

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Economía

Asesor

Juan David Osorio Múnera Magíster (MSc) en Economía del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Económicas
Maestría en Economía
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita

(Zapata Cortínez, 2022)

Referencia

Zapata Cortínez, A. (2022). *Aproximación al costo social de las emisiones de carbono en Colombia* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Estilo APA 7 (2020)



Maestría en Economía, Cohorte XVIII.

Grupo de Investigación Microeconomía Aplicada.

Programa Científico Colombiano: convocatoria de propuestas Ecosistema Científico.



Centro de Documentación Economía

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jair Albeiro Osorio Agudelo

Jefe departamento: Claudia Cristina Medina Palacios

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por el Programa Científico Colombiano en el marco de la convocatoria de propuestas Ecosistema Científico (Contrato No. FP44842-218-2018).

Resumen

Las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera producen un cambio climático que afecta negativamente a la economía y al bienestar social. Dichos costos no son tenidos en cuenta en los precios de los bienes de las empresas contaminadoras, por lo que la sociedad no es compensada por estos daños. Este trabajo tiene como objetivo estimar un indicador del costo para la sociedad colombiana de las emisiones de CO_2 (CSC), medido a través de la importancia económica y social del servicio ecosistémico de captura de carbono identificado en la literatura, utilizando observaciones entre los años 1989 y 2018, a valores de 2021 y calculando su valor presente neto. Se emplean métodos del metaanálisis y la técnica de transferencia de beneficios. Así, se encontró que el CSC en Colombia oscila entre \$185.502 y \$353.970 pesos COL por tonelada de CO_2 , lo cual es superior al impuesto al carbono actual de \$18.829 pesos COL por tonelada de CO_2 . Esto sugiere que el valor del impuesto al carbono en Colombia es bajo y no iguala al verdadero costo para la sociedad de las emisiones. Sin embargo, debido al bajo número de observaciones, los datos utilizados presentan una alta dispersión, por lo que los resultados aún son inciertos. Este indicador complementa el análisis del verdadero CSC en el país y es útil para los proyectos de evaluación económica, social y ambiental de tecnologías, programas de mitigación del cambio climático, licenciamiento ambiental de proyectos y para la política pública del cambio climático.

Palabras clave: externalidades, impuestos ambientales, adopción y costos del control de la contaminación, contaminación del aire, servicios ecosistémicos

Clasificación JEL: D62, H23, Q52, Q53, Q57

Abstract

Greenhouse gas emissions into the atmosphere produce climate change that negatively affects the economy and social welfare. These costs are not considered in the prices of the polluting companies' goods, so society is not compensated for these damages. The objective of this paper is to estimate an indicator of the cost to Colombian society of CO_2 emissions (CSC), measured through the economic and social importance of the carbon sequestration ecosystem service identified in the literature, using observations between the years 1989 and 2018, to 2021 values and calculating their net present value. Meta-analysis methods and the benefit transfer technique are used. Thus, it was found that the CSC in Colombia ranges between \$185,502 and \$353,970 COL pesos per ton of CO_2 , which is higher than the current carbon tax of \$18,829 COL pesos per ton of CO_2 . This suggests that the value of the carbon tax in Colombia is low and does not equal the true cost of emissions to society. However, due to the low number of observations, the data used have a high dispersion, so the results are still uncertain. This indicator complements the analysis of the true CSC in the country and is useful for projects of economic, social, and environmental evaluation of technologies, climate change mitigation programs, environmental licensing of projects and for public policy on climate change.

Keywords: Externalities, Environmental Taxes, Pollution Control Adoption and Costs, Air Pollution, Ecosystem Services

JEL Classification: D62, H23, Q52, Q53, Q57

Introducción

La literatura refleja la creciente preocupación en el mundo por los costos que genera el cambio climático, que afectan el crecimiento económico y el bienestar de la sociedad. Esto se debe a las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera que, con el tiempo, producen afectaciones a la salud humana, a la productividad agrícola, daños en la propiedad por el aumento del potencial destructivo de eventos naturales extremos, entre otros (Cartes, 2018; Stern, 2007; Hanemann, 2008; CEPAL, 2019). Por ejemplo, entre 2010 y 2011, el fenómeno de la Niña en Colombia generó un costo total de \$11,2 billones, de los cuales el 61% corresponde a una afectación al acervo de capital productivo. (CEPAL, 2012. p. 61). Estos costos disminuyen el bienestar de la sociedad, dado que no se compensan a través del mercado; es decir, algunas empresas contaminadoras solo tienen en cuenta el costo de los insumos en los precios de producción del bien que producen, sin considerar el costo en el margen, de los daños que generan, por lo que la producción del bien puede ser mayor a la socialmente deseable (Stern, 2006).

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés) la generación de energía eléctrica es uno de los grandes contribuyentes al cambio climático, representando del 40% de las emisiones mundiales de CO_2 provenientes de la quema de combustibles. Las plantas que generan energía a partir del carbón emiten más del 70% de las emisiones asociadas (IEA, 2022). Lo anterior ha contribuido en conjunto con otras actividades humanas al aumento en la temperatura global del planeta. Sin embargo, Colombia cuenta con la sexta matriz de generación eléctrica más limpia del mundo, ya que el 65,9% de la capacidad efectiva neta proviene de fuente hidráulica, el 31,4% es térmica, el 1,06% es a partir de cogeneradores, el 1,47% es solar y el 0,1% es eólica (XM, 2022). En contraste, para el año 2021, la mayor parte de la capacidad instalada en el mundo es a partir del carbón con 36%, en promedio, seguido de gas natural con 23%, energía hidráulica con 15%, otras energías renovables con un 13%, energía nuclear con 10% y petróleo con 3% (IEA, 2020).

Aunque Colombia solo contribuye con el 0,4% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) (Vergara et al., 2021), para el país es prioritario reducir las emisiones de GEI a la atmósfera, dado su compromiso bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) a reducir en un 51% sus emisiones al 2030; además, teniendo en cuenta que el país es altamente vulnerable a los efectos del cambio climático, debido a su alta

dependencia del recurso hídrico para la generación de energía eléctrica. Según XM (2022), durante la última década, cerca del 80% del consumo de energía eléctrica del país proviene de hidroeléctricas, lo cual representa un riesgo importante frente a variaciones hidrológicas, como el Fenómeno del Niño (2009 - 2010), que obligan a cubrir la demanda con otros tipos de energía como la térmica, cuya generación es más costosa y genera mayores emisiones de CO_2 a la atmósfera. Lo anterior se evidenció en el sector energético durante 2009 – 2010, pasando de un promedio de emisiones de 6 millones de toneladas de CO_2 a 9,2 millones para este período. (pp. 11, 15).

Además, Bernal et al. (2022) afirman que la economía del país podría verse afectada si no se adoptan medidas de mitigación del cambio climático, disminuyendo en ocho (8) puntos porcentuales del PIB a finales del siglo (para el año 2100). Por el contrario, en un escenario con políticas de mitigación¹ y de adaptación², el PIB disminuiría en dos (2) puntos porcentuales, en el mismo horizonte de tiempo. Los autores muestran que los impactos negativos serían mayores si no se adoptan políticas de mitigación y se verían reflejados en la balanza de la cuenta corriente, dada la dependencia del país de las exportaciones del petróleo y el carbón; en las finanzas públicas, en el sector financiero, en la política monetaria y, en general, aumentaría la volatilidad macroeconómica. Por lo anterior, los autores recomiendan diversificar la matriz exportadora y las fuentes de ingresos tributarios, focalizar el gasto público en medidas de mitigación que aceleren la transición energética y adoptar políticas que contribuyan a cambiar la estructura del aparato productivo y de los patrones de consumo, por lo que toma especial relevancia la discusión sobre los impuestos al carbono.

En la teoría económica, el impuesto al carbono óptimo sería equivalente al costo social del carbono - CSC, es decir, que el CSC representa el impuesto pigouviano óptimo que se debe aplicar a las emisiones de CO_2 , para internalizar la externalidad negativa y así, alcanzar una asignación óptima en la economía. Esto significa que, en un marco de optimización, los beneficios marginales

¹ De acuerdo con el programa para el medio ambiente de la Organización de las Naciones Unidas – ONU, la mitigación del cambio climático se refiere a los esfuerzos para reducir o prevenir las emisiones de gases de efecto invernadero; por ejemplo, el uso de nuevas tecnologías y energías renovables, el aumento en la eficiencia energética de equipos antiguos o el cambio en las prácticas de gestión o el comportamiento de los consumidores. (ONU, s.f.).

² La adaptación se refiere a los ajustes en los sistemas ecológicos, sociales o económicos que se generan como respuesta al cambio climático y a sus efectos (CMNUCC, s.f.).

de las emisiones deberían ser iguales a los daños marginales asociados con el CO_2 , por lo que el impuesto al carbono óptimo debe equipararse al CSC (OECD, 2018).

En el esfuerzo por combatir el cambio climático, reduciendo las emisiones de GEI, Colombia ha adoptado un impuesto al carbono correspondiente a \$18.829 (aproximadamente \$USD 5) por tonelada de CO_2 para el 2022 (DIAN, 2022). Este impuesto busca desincentivar el uso de combustibles fósiles e incentivar el uso de tecnologías más amigables con el medio ambiente, lo que responde a los compromisos de Colombia en el marco del Acuerdo de París.

El impuesto al carbono fue creado por medio de la Ley 1819 de 2016, mediante el artículo 221. El impuesto consiste en el pago de una tarifa por el contenido de carbono en los combustibles fósiles (incluidos los derivados del petróleo y todo tipo de gas fósil), el cual se libera en forma de GEI cuando se realiza la combustión de los combustibles con fines energéticos.

Los combustibles gravados por el impuesto son la gasolina, el Kerosene, el Jet Fuel, el ACPM, el Fuel Oil, el gas natural (cuando se usa en la industria de la refinación de hidrocarburos y la petroquímica), y el gas licuado de petróleo (GLP) (cuando se vende a usuarios industriales). Las emisiones de estos combustibles representan cerca del 24% de las emisiones totales del país. Esto da una idea de la magnitud de la cobertura del impuesto.

El impuesto se genera en la cadena de distribución, en los siguientes momentos: se vende dentro del territorio nacional, cuando el productor del combustible lo retira o lo importa para el consumo propio o cuando lo importa para la venta de combustibles fósiles. Las anteriores acciones son los hechos generadores. Este impuesto se causa en una sola etapa respecto del hecho generador que ocurra primero o, lo que es lo mismo, el impuesto solo se cobra una vez en la acción que ocurra primero, ya sea, la venta, el retiro o la importación. En el caso del gas y de derivados de petróleo, el impuesto se causa en las ventas efectuadas por los productores, en la fecha de emisión de la factura; en los retiros para consumo de los productores, en la fecha del retiro; en las importaciones, en la fecha en que se nacionalice el gas o el derivado de petróleo.

El sujeto pasivo del impuesto será quien adquiera los combustibles fósiles, del productor o el importador; el productor cuando realice retiros para consumo propio; y el importador cuando realice retiros para consumo propio. En el caso de derivados de petróleo, los productores y los importadores son responsables del impuesto; independientemente de su calidad de sujeto pasivo, cuando se realice el hecho generador. Así, los consumidores de combustible que sean generadores de emisiones de CO_2 , deben realizar el pago de una tarifa específica, que a 2022 es de \$36 por

metro cúbico de gas natural por parte del usuario final, \$119 por galón de Gas Licuado de Petróleo, \$169 por galón de gasolina, \$186 por galón de Kerosene y Jet Fuel, \$191 por galón de ACPM y \$222 por galón de Fuel Oil. La tarifa por tonelada de CO_2 se ajustará cada primero de febrero con la inflación del año anterior más un punto hasta que sea equivalente a una (1) UVT³ por tonelada de CO_2 , por lo que los valores por unidad de combustible crecerán a la misma tasa.

Para el 2021, el impuesto a las emisiones de CO_2 en Chile también es de aproximadamente \$USD 5 y cubre el 39% de las emisiones del país, lo cual es superior a la cobertura que tiene el impuesto al carbono en Colombia del 24% del total de las emisiones; sin embargo, el Ministerio de Energía de Chile plantea que el diseño del impuesto y su bajo valor no han empujado a cambios significativos, por lo que, García (2022) recomienda “una ruta creciente de precio al carbono, requiriendo valorizar adecuadamente las externalidades negativas de las emisiones del uso de energía”. Otros países han adoptado un impuesto más alto que Chile y Colombia; pero presentan una cobertura del total de sus emisiones inferiores a las de estos países. Así, por ejemplo, Argentina tiene un impuesto de \$USD 5,5, con una cobertura del 20% de las emisiones del país, siendo esta cobertura más baja que las de Chile y Colombia; Canadá con un impuesto de \$USD 31,8 y una cobertura del 22% de sus emisiones; Portugal con \$USD 28,2, con una cobertura del 29% de las emisiones; España con \$USD 17,6, que tan solo cubren el 3% de las emisiones; Francia con \$USD 52,4 (representa una cobertura del 35% de las emisiones) y Dinamarca que presenta un rango entre \$USD 23,6 y \$USD 28,1 (que cubren el 35% de las emisiones). Otros países, por el contrario, cuentan con un impuesto al carbono más alto y a su vez tienen mayores coberturas de sus emisiones, como lo son: Suecia con \$USD 137,2 (cobertura del 40% de las emisiones) y Noruega con un rango entre \$USD 3,9 y \$USD 69,3 (que cubre el 66% de las emisiones). (Banco Mundial, 2021)

El Banco Mundial (2021) afirma que, para lograr el objetivo de la temperatura de 2 °C, dichos impuestos deben ser lo suficientemente ambiciosos, es decir, que alcancen precios entre 40

³ Una UVT (Unidad de Valor Tributario) es la medida equivalente en pesos utilizada para simplificar los cálculos y se utiliza para el pago las obligaciones tributarias y de otras rentas estatales. Fue creada por el Gobierno de Colombia y la calcula anualmente la DIAN. Para realizar el cálculo se ajusta el valor del año anterior por la variación del índice de precios al consumidor - IPC para ingresos medios, certificado por el DANE, en el período comprendido entre el 1 de octubre del año anterior al gravable y la misma fecha del año inmediatamente anterior a este. Así, por ejemplo, para el 2022 la UVT se calcula tomando la variación del IPC del periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2020 y el 1 de octubre de 2021, que sea certificada por el DANE y ratificada por la DIAN. La UVT es el valor techo de la tarifa del impuesto al carbono por tonelada de CO_2 . Para el 2022, la UVT es de \$38.004. Este valor no es superado por el valor de la tarifa del impuesto para el 2022, por lo cual, el valor de la tarifa se sigue ajustando año a año hasta que sea equivalente a una UVT por tonelada de CO_2 , de acuerdo con el parágrafo 1. del artículo 222 de la Ley 1819 de 2016.

– 80 USD/tCO₂e. Sin embargo, se deben tener en cuenta ciertas consideraciones relacionadas con la competitividad, el impacto distributivo, la coherencia con otros instrumentos y la viabilidad política, que hace que los impuestos varíen mucho por país y jurisdicción.

Por su parte, la CEPAL (2019) en un estudio de metaanálisis con 261 observaciones, encuentra que el costo promedio para la sociedad de las emisiones de carbono es de 25,83 dólares por tonelada de CO₂, con una desviación de 0,84. Este valor es sensible a la tasa de descuento utilizada⁴; así, por ejemplo, con tasas de descuento cercanas a cero, es de 100 dólares la tonelada de carbono; mientras que, con una tasa mayor al 3%, el costo es de 6 dólares por tonelada de carbono. Lo que implica que cuando la tasa de descuento es muy baja o cercana a cero, las generaciones del presente asumen, principalmente, el costo de los daños asociados al cambio climático (CSC) y, por el contrario, con tasas de descuento más altas, las generaciones futuras son quienes pagan en mayor medida el valor de dichos daños. Además, dichas estimaciones, por lo general, excluyen los potenciales efectos de eventos catastróficos extremos. Estos resultados sugieren un valor que se podría utilizar para aproximarse al valor del impuesto óptimo; sin embargo, este valor se considera conservador, debido a la incertidumbre climática y por los procesos socioeconómicos como las migraciones, que aún no han sido completamente analizados.

Lo anterior sugiere que probablemente el impuesto al carbono en Colombia es bajo y no está compensando el verdadero costo para la sociedad de las emisiones. Para establecer si existe esa disparidad entre lo que se recauda y lo que le cuesta a la sociedad las emisiones de carbono, este trabajo busca responder a la pregunta ¿cuál es el costo del carbono para la sociedad colombiana? Para responder a esto, se utilizan datos entre los años 1989 y 2018, los cuales se extrapolan a valores de 2021. De acuerdo con la literatura, el CSC se define como el valor monetario que paga la sociedad por el daño ocasionado al medio ambiente al emitir una tonelada adicional de CO₂ a la atmósfera, lo que se refleja en la productividad de las actividades económicas, el bienestar social y los ecosistemas (Watkiss & Downing, 2008).

⁴ El papel que cumple la tasa de descuento es ponderar el valor de los daños asociados al cambio climático en el tiempo. La tasa de descuento tiene implícito dos supuestos: la utilidad marginal decreciente del ingreso y la impaciencia de los individuos en el consumo; por lo que un mayor ingreso en el futuro debe ponderarse por una tasa de descuento. En la literatura hay un debate acerca de cuál debe ser la tasa de descuento a aplicar, ya que esto tiene implicaciones sobre la equidad entre generaciones presentes y futuras y, entre grupos de ingreso altos y bajos. Si se espera que en el futuro haya un crecimiento económico mayor, se debería aplicar tasas de descuento mayores y, por el contrario, si se espera un menor crecimiento, entonces puede utilizarse una tasa de descuento que disminuya en el tiempo.

En ese sentido, es importante estimar el costo para la sociedad de los daños ocasionados por las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Logrando lo anterior, este trabajo contribuye a la generación de un instrumento para la política pública, que ayude a internalizar las externalidades negativas para la sociedad del cambio climático, incentivando el uso de tecnologías más limpias y, por ende, minimizando el impacto en el medio ambiente. Esto puede contribuir a preservar los niveles de ahorro e inversión futuros y alcanzar un crecimiento y desarrollo económico sostenible (CEPAL, 2019). Este trabajo se estructura de la siguiente manera: en la primera sección se da a conocer la manera en que la literatura ha abordado el problema de investigación; en la segunda sección se explica la metodología utilizada y en la tercera sección se muestran los principales resultados y conclusiones.

1 Marco teórico

No existe un tratamiento unificado en la literatura sobre la forma de medir el costo social del carbono. En términos generales, la literatura refleja el esfuerzo por asignar un valor económico a los efectos del cambio climático. De acuerdo con Cartes (2018), Champ et al. (2017), Navrud & Ready (2007) y la CEPAL (2019), se identifica que las cinco metodologías más usadas para estimar el CSC son: con base en precios de mercado; el cálculo monetario del costo marginal del carbono mediante los Modelos de Análisis Integrado (IAM, por sus siglas en inglés); costos marginales de abatimiento o de reducción de emisiones; metaanálisis y valoración del servicio ecosistémico de captura de carbono mediante la técnica de transferencia de beneficios.

En un ejercicio de metaanálisis con 261 observaciones, la CEPAL (2019) encuentra que la metodología más utilizada para estimar el CSC son los modelos IAM, con el 84% de las observaciones, a nivel mundial. Entre estos modelos, los más empleados son el modelo DICE (Dynamic Integrated Model of Climate-Economy model), el RICE (Regional Integrated Model of Climate-Economy model), el PAGE (Policy Analysis of the Greenhouse Effect), el modelo dinámico estocástico de equilibrio general computable (DSGE) y el modelo FUND (The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution), los cuales presentan un enfoque principalmente macroeconómico. Este método monetiza los daños asociados a un aumento de emisión de carbono hoy y en el futuro, ya que tiene en cuenta el daño del carbono al mantenerse en la atmósfera, utilizando un horizonte de tiempo de 100 años. Las estimaciones de estos modelos son variadas y heterogéneas, debido a que depende de los supuestos y del valor de los parámetros incorporados, tales como diferencias en las tasas de interés de descuento y de pesos específicos por nivel de ingreso per cápita (equity weights), el uso de diferentes métodos y supuestos en la valoración económica, distintas formas de incorporar el riesgo y la incertidumbre sobre la ocurrencia de eventos climáticos extremos, la sensibilidad del clima a los niveles de concentraciones de CO_2 en la atmósfera y el tiempo o el ciclo de vida del carbono utilizados. Esta metodología presenta limitaciones como son el tratamiento incompleto de impactos no catastróficos, el tratamiento incompleto de posibles impactos catastróficos, sensibilidad a la tasa de descuento y sensibilidad Climática.

El modelo PAGE, propuesto por Chris Hope, (2006), es un modelo estocástico de evaluación integrada del cambio climático que permite captar la incertidumbre debido a la

naturaleza aleatoria del fenómeno analizado. En este modelo, los impactos o costos del cambio climático son evaluados como porcentaje de pérdidas del PIB anual en cada región y se agregan usando tasas de descuento variables en el tiempo. Además, tiene en cuenta impactos intangibles como los ambientales y sociales que no son directamente incluidos en el PIB. El modelo es capaz de evaluar los impactos resultantes de eventos climáticos extremos y permite tasas de descuento variables en cada periodo de tiempo y región, usando una función de crecimiento óptima de tipo Ramsey con una tasa de preferencia Intertemporal (Allegue, 2014).

En cuanto al modelo FUND, propuesto por Richard Tol, (1997), estima los impactos del cambio climático en el crecimiento económico y poblacional, en un contexto dinámico y permite la incorporación de incertidumbre. Los escenarios de crecimiento económico y de población son perturbados por los impactos del cambio climático. Estos choques son modelados como pérdidas que reducen el ingreso disponible. El ingreso y la población son principalmente exógenos y la parte endógena involucra las emisiones de carbono, las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, óxido nitroso, metano, la temperatura media global, y los impactos del cambio climático sobre las zonas costeras, la agricultura, el clima extremo, los ecosistemas naturales y la malaria. Este modelo también considera daños intangibles y tangibles; estos últimos afectan la inversión y el consumo. La vulnerabilidad relativa al cambio climático varía con el desarrollo económico. La fortaleza de este modelo es la desagregación de impactos por sectores (Allegue, 2014).

Nordhaus y Boyer, (2000) propusieron el modelo RICE, el cual es un modelo de optimización dinámica que se deriva del DICE y es una extensión del modelo neoclásico de crecimiento económico de Ramsey. El modelo RICE parte del hecho de que los combustibles fósiles que son usados como insumo en la producción, generan emisiones de CO_2 a la atmósfera, lo que conlleva a un aumento en la temperatura y como consecuencia, a unos efectos negativos en la economía (costos), con una posibilidad, aunque baja, de pérdida catastrófica de 30% del producto total (Ackerman y Finlayson, 2006; citado en CEPAL, 2019). Este modelo permite estimar la senda óptima de producción del stock de capital y de las emisiones de carbono, tomando a la variable inversión como la reducción en las emisiones, lo que permitiría obtener un mayor consumo en el futuro. El crecimiento poblacional y el cambio tecnológico son variables exógenas; mientras que la acumulación de capital es endógena. Este método permite obtener una estimación económica por regiones de los efectos del cambio climático, al involucrar e integrar múltiples elementos entre los que se destacan factores que afectan el crecimiento económico, las emisiones de CO_2 , el ciclo

del carbono, impactos y daños climáticos. Así, las naciones se enfrentan a las decisiones económicas de consumir bienes y servicios, invertir en capital productivo y retrasar el cambio climático mediante la reducción de emisiones de CO_2 . El modelo puede ser usado en la evaluación de políticas del cambio climático ya que maximiza el bienestar económico (consumo intergeneracional). Además, tiene en cuenta el papel de los impuestos de carbono, lo cual es de gran utilidad para calibrar las políticas ambientales (Allegue, 2014) y concluye que el costo marginal del control de CO_2 puede ser implantado de manera eficiente a través de impuestos, regulaciones o permisos negociables (Barrientos, 2020).

Por último, entre los modelos IAM, el Modelo Dinámico Estocástico de Equilibrio General computable (DSGE) fue planteado por Golosov et al. (2014), a partir de la idea de que el uso de la energía fósil provoca un cambio climático que genera externalidades negativas, propone una fórmula para el daño marginal de las emisiones por externalidad (o, de manera equivalente, para el impuesto al carbono óptimo), que revela que el daño es proporcional al PIB actual. Esta proporción depende de tres factores: la tasa de descuento, la elasticidad del daño esperado (cuánto porcentaje del flujo de producción es perdido por una unidad extra de carbono en la atmósfera) y la estructura de la depreciación del carbono en la atmósfera. Los resultados obtenidos muestran que el impuesto óptimo debería ser un poco más alto que en las estimaciones más conocidas en la literatura y que el carbón, más que el petróleo, es la principal amenaza para el bienestar económico, en gran parte debido a su abundancia (Allegue, 2014).

En general, las metodologías con base en precios de mercado, de costos marginales de abatimiento, el metaanálisis y la valoración del servicio ecosistémico de captura de carbono han sido estimaciones colaterales al CSC. La metodología con base en precios de mercado se estima utilizando los precios de los bonos de carbono como una variable proxy de la disposición a pagar social por reducir una tonelada de emisión de GEI.

Por su parte, la metodología de costos marginales de reducción de emisiones emplea las curvas de costo marginal de abatimiento para comparar el costo de reducir las emisiones entre diferentes alternativas. Acá se suelen usar las directrices del Panel Intergubernamental del Cambio Climático presentadas en IPCC (2006). La construcción metodológica más conocida fue desarrollada por McKinsey & Co, (2009), en la cual, el costo de abatimiento se calcula por medio del costo anualizado o costo equivalente anual (CAE) de distintas medidas en un año, por tonelada de CO_2e (dióxido de carbono equivalente) evitada, comparando con el año base. Además, permite

comparar el costo - efectividad de opciones de mitigación con diferente vida útil (Clerc et al., 2013). A nivel mundial, se ha identificado una tendencia a utilizar en los análisis de costo beneficio un precio sombra del carbono derivado de este método (Watkins, et al., 2006, citado por la CEPAL, 2019), esto con el fin de que el precio del carbono sea más cercano al costo de los procesos de mitigación (CEPAL, 2019). Las limitaciones de esta metodología son la dificultad para capturar las interacciones entre diferentes medidas de mitigación, solo tiene en cuenta los costos directos, sin considerar factores estratégicos, operativos o políticos, la presencia de distorsiones en los mercados por las barreras no comerciales, el tratamiento limitado de la incertidumbre y los supuestos utilizados en los parámetros de vida útil de las alternativas, rendimiento y tasa de descuento (Cartes, 2018).

De acuerdo con la CEPAL (2019), a nivel mundial, existen abundantes estudios y resultados sobre el costo social del carbono (CSC) y una amplia literatura que busca identificar el impuesto al carbono óptimo. Estos estudios son muy variados y heterogéneos, dado que dependen de los supuestos y la tasa de descuento utilizada. Con el fin de minimizar el sesgo que pueda generarse en los resultados de la estimación del CSC, debido al nivel de incertidumbre asociado a las variables climáticas o a procesos socioeconómicos como las migraciones, la CEPAL (2019) sugiere que el CSC esté acompañado de análisis complementarios, es decir la comparación entre los resultados de dos o más metodologías. También, recomienda que el valor del CSC esté sujeto a revisiones periódicas y que, en países en desarrollo se emplee una política pública de precios diferenciados del carbono, debido a que la elasticidad precio de la demanda de energía y gasolinas es inelástica, por la existencia de pocos bienes y servicios sustitutos. Esto dificulta que un alza de los precios de los combustibles conduzca a la adecuada sustitución de bienes y servicios con alto contenido de carbono; además, teniendo en cuenta, los posibles impactos de un CSC en la distribución del ingreso o en la competitividad internacional de estos países.

En el caso de estudios aplicados a Colombia, la literatura es escasa. Así, por ejemplo, en bases de datos de EBSCO, Science Direct, Scopus, Web of Science y Google Scholar se hallaron solo nueve (9) artículos para el país; los cuales, son empíricos, aplicados a un contexto particular y se centran principalmente en estimar el CSC a partir del servicio ecosistémico de captura de

carbón⁵, mediante la técnica de transferencia de beneficios, extrapolando los valores obtenidos por el gobierno de los Estados Unidos o utilizando el valor encontrado por la CEPAL (2019) (25,83 dólares por tonelada de CO_2).

En cuanto a la metodología con base en precios de mercado, se encontraron tres (3) artículos. Uno de ellos es el de Fedesarrollo, en el cual García et al. (2013) realizan un análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia. Por su parte, Zárate, T & Maldonado, J. (2014), siguiendo los artículos de Murray, et al. (2011) y Nellemann et al. (2009), construyen una función de beneficios y estiman posibles escenarios futuros del precio del carbono para ecosistemas marinos, con el fin de aproximarse al valor monetario asociado al servicio de captura de carbono. Sin embargo, es necesario resaltar que, de acuerdo con Cartes (2018), esta metodología presenta limitaciones, debido a que, el valor resultante en las transacciones de la tonelada de CO_2 puede subestimar el verdadero CSC ya que, está determinado en un mercado no competitivo con restricciones a las transacciones entre las partes.

Solo se halló un trabajo para Colombia que emplea la metodología de costos marginales de reducción de emisiones, en el cual, Corredor et al. (2014) analizan las emisiones de GEI en los sectores agropecuario, residuos, energético y transporte, estableciendo una línea base y otras opciones de mitigación, con el objetivo de realizar un análisis costo – efectividad y la elaboración de la curva de abatimiento. En este trabajo hay un espacio para futuras investigaciones que puedan actualizar la información para calcular las curvas de costo marginal de abatimiento, dado que dicha información depende de las tecnologías actuales y en los últimos siete años se han generado avances tecnológicos.

Por otra parte, Duque (2003) estima el CSC, mediante el análisis de diferentes proyectos forestales, utilizando un modelo de optimización MARKAL con General Algebraic Modelling System – GAMS, simulando doce (12) escenarios con variaciones en oferta y demanda. En este modelo el objetivo es minimizar los costos de captura de CO_2 , con lo que estima una curva de costos marginales de captura de CO_2 para Colombia. El autor concluye que Colombia posee

⁵ El servicio ecosistémico de captura de carbono hace referencia a la contribución de los ecosistemas para capturar o remover emisiones de GEI de la atmósfera, lo que aporta al bienestar social. Esta remoción se hace, principalmente, mediante el intercambio gaseoso de las estomas de las hojas, incorporando los gases y contaminantes al interior de ellas, o por la deposición de partículas en la superficie de la planta. Otros servicios ecosistémicos son, por ejemplo, la regulación climática, la provisión y regulación del agua, la seguridad alimentaria, la prevención y mitigación de desastres y la recreación. Todos estos servicios representan beneficios para la sociedad y son esenciales para la sostenibilidad económica, social y ambiental (González, 2019).

ventajas con respecto a varios países, ya que presenta costos más bajos de reducción de emisiones en actividades enmarcadas en el uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura.

Lozano (2007) valora el servicio ecosistémico de captura de carbono en el pacífico colombiano, en el área de manglar de la Unidad de Manejo Integral Guapi-Iscuandé, encontrando que el costo social de la fijación de carbono en el marco de la formulación de un proyecto MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpios) es de USD 7.87 por tonelada de CO_2 .

Los demás artículos encontrados para Colombia utilizan la técnica de transferencia de beneficios para extraer los valores del CSC estimados por el gobierno de EEUU o por la CEPAL (2019), con artículos de referencia tales como EPA (2016), Nordhaus (2016), Nordhaus (2013), Ackerman, F & Munitz (2012), Hope (2006), Anthoff et al. (2011), Nowak et al. (2016) y CEPAL (2019). Así, Berrío et al. (2015) hacen una aplicación al sector energético colombiano, con el fin de valorar Proyectos de Energía Renovable utilizando indicadores de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Para ello, extrapolan datos de la U.S. Environmental Protection Agency – EPA y utilizando una tasa de descuento del 3% para calcular los precios entre 2006 y 2009, para estimar los costos promedio de generación de energía, a partir de tecnologías como la hidráulica, térmica a carbón, térmica a gas y eólica, considerando el CSC en los costos variables de generación. El artículo encuentra que teniendo en cuenta el CSC, la energía eólica podría tener más oportunidad de penetrar en el mercado y la energía térmica a carbón y a gas pierden competitividad frente a tecnologías renovables. Además, se encontró un estudio para la reserva bosque oriental de Bogotá, en el cual, Cortés, G. (2019), utiliza el valor para el CSC propuesto por la CEPAL (2019) de 25,83 USD, obtenido a partir del promedio de diferentes estudios para el año 2019, con una tasa social de descuento de - 3,9 %. El autor encuentra que el CSC debido al cambio de cobertura entre 1999 y 2019 es de \$USD 3.366.605. Para los cerros Nutibara y Volador de Medellín, González (2019) utiliza el software iTree Eco, el cual estima el valor monetario asociado a los servicios ecosistémicos ofrecidos por las áreas verdes, con base en los valores medios de las externalidades en Estados Unidos para cada tonelada de contaminante.

Las principales autoridades identificadas en la literatura del CSC son, a nivel supranacional, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), con su grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y el Protocolo de Kyoto; a nivel nacional de EEUU, la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) y, en específico en el caso colombiano, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y el ANLA.

Finalmente, en la revisión de la literatura se evidencia la baja disponibilidad de artículos para Colombia que contengan una medición del CSC y estas estimaciones se realizaron, principalmente, extrapolando valores obtenidos por EPA (2016) y CEPAL (2019). Con el fin de contribuir a llenar este vacío en la literatura para Colombia y, dadas las diversas metodologías existentes para el cálculo del CSC, las cuales difieren significativamente en los resultados, este trabajo busca acotar e identificar patrones que permitan reducir el margen de incertidumbre para la política pública. Así, el objetivo de este trabajo es estimar un indicador del costo para la sociedad colombiana de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera para el año 2021, mediante una síntesis de los valores de disponibilidad a pagar por el servicio ecosistémico de captura de carbono identificados en la literatura relevante, utilizando métodos del metaanálisis y la técnica de transferencia de beneficios, de manera que este indicador sea útil para la política pública del cambio climático en Colombia.

2 Metodología

Considerando las alternativas de métodos propuestos en la literatura, para este trabajo se utiliza la metodología de transferencia de beneficios, utilizando técnicas del metaanálisis, a partir de estudios de valoración del servicio ecosistémico de captura de carbono. Esto con el fin de estimar el valor económico de la importancia del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono. De acuerdo con la CEPAL (2019), este método es una forma indirecta de estimar el CSC. Para ello, se hace un análisis de los artículos disponibles a nivel mundial, en los cuales se realiza la valoración de la disponibilidad a pagar por el servicio que prestan los ecosistemas de capturar o almacenar una tonelada de CO_2 . Esto es una base para la implementación de políticas públicas que atiendan el desafío del cambio climático. En este caso, la política pública sería conservar los ecosistemas que contribuyen a remover los contaminantes atmosféricos.

De acuerdo con Zárate, T & Maldonado, J (2014), “el servicio de captura y almacenamiento de carbono ha sido reconocido por su contribución a la mitigación del cambio climático”. Así, investigaciones acerca de las dinámicas de los ecosistemas y el desarrollo de mercados de emisiones, entre otros mecanismos, ha evidenciado dicha contribución, generando incentivos para la conservación de los ecosistemas que prestan este servicio.

La técnica de transferencia de beneficios es un instrumento desarrollado por los economistas ambientales con el que se pueden estimar los costos o beneficios ambientales provistos por los ecosistemas, de una manera eficiente, es decir, a un bajo costo de implementación y en un periodo de tiempo razonable (Bergstrom, 1996). Esta técnica consiste en el traspaso del valor monetario de la importancia del servicio ecosistémico de captura de carbono, estimado en trabajos realizados en sitios de estudio diferentes al sitio de política. Las cifras derivadas de la transferencia de beneficios constituyen una primera aproximación, valiosa para tomadores de decisiones, acerca de los beneficios o costos de adoptar una política o programa (Osorio, 2006; Osorio & Correa, 2009) y, a pesar de existir riesgo de obtener resultados sesgados al emplear este método, un buen tratamiento de extrapolación de resultados respaldado por la solidez teórica de los valores y caracterización específica del lugar a evaluar permite reducir el sesgo de las conclusiones obtenidas (Bergstrom, 1996; Osorio & Correa, 2009). Por tanto, la aplicación de los resultados previos de otras investigaciones es una buena alternativa para valorar la importancia social del almacenamiento de carbono.

Según Brookshire y Neill (1992), el método de Transferencia de Beneficios se divide en tres enfoques principales: transferencia de valores, juicio de especialistas, y la transferencia de funciones o metaanálisis. La transferencia de valores es la directa aplicación de las estadísticas de la investigación original (como la medida de disponibilidad a pagar DAP, medida de efecto marginal o elasticidad) al sitio de política y puede realizarse mediante la transferencia de puntos estimados, la transferencia de medidas de tendencia central y transferencia de estimaciones administrativamente aprobadas. Por su parte, la transferencia de funciones es un proceso más técnico que la transferencia de valores y consiste en tomar las funciones o modelos estadísticos estimados de la función de demanda o de beneficio del bien ambiental. Para esto, se utiliza información del sitio de política en la función, para encontrar el valor a transferir. Otra alternativa es el metaanálisis donde se utilizan los resultados de muchos estudios y las características metodológicas del mismo, para estimar un modelo que explique estadísticamente las variaciones en los valores estimados, a través de las características de los sitios de estudio. Finalmente, la técnica de juicio de especialistas consiste en estimar la medida de valor de un proceso de consulta a grupo de expertos.

De acuerdo con Lindhjem y Navrud (2008), aunque el metaanálisis se usa cada vez más para sintetizar la literatura de valoración económica y ambiental, muy pocos estudios de transferencia de beneficios usan el metaanálisis. Sin embargo, “los metanálisis de los estudios de valoración entre países son una herramienta potencialmente poderosa para la transferencia de beneficios, especialmente para los bienes ambientales donde la literatura nacional es escasa.” A continuación, se describen los pasos para realizar la transferencia de valores y se plantea la técnica a implementar para estimar el valor de la importancia del servicio ecosistémico de captura de carbono como proxy del costo social de las emisiones de carbono para Colombia.

La técnica seleccionada para estimar el CSC es el tratamiento de los registros bibliográficos por transferencia de metaregresión como método que minimiza el sesgo ante escenarios de gran incertidumbre y logra sintetizar la información de los estudios seleccionados. Además, este método mejora la calidad de las revisiones de literatura para generar valores unitarios ajustados. Para ello, los estudios primarios se analizan como un grupo, en el que los resultados de cada estudio son una observación para el modelo estadístico. Esto permite evaluar la influencia de las características del bien ambiental, las características de las muestras (incluidas las características de la población afectada por el cambio en la calidad ambiental), el método de valoración utilizado y los supuestos

del modelo. Las ecuaciones de regresión resultantes que explican las variaciones en los valores unitarios se pueden usar junto con los datos recopilados sobre las variables independientes en el modelo que describe el sitio de la política para construir un valor ajustado (Ready y Navrud, 2006). El proceso metodológico propuesto basado en Champ *et al.* (2017), Osorio y Correa (2009), Rosenberger y Loomis (2003) es el siguiente:

- **Paso 1:** definir el contexto de política. Esta definición incluye la información del sitio de política, las necesidades de información y las unidades de medición.
- **Paso 2:** desarrollar una base de datos estructurada. Revisión de literatura y obtención de copias de potenciales publicaciones relevantes. Realizar una estrategia de codificación que permita reunir la mayor información posible del estudio. Debe incluir las variables dependientes e independientes, características metodológicas y autores.
- **Paso 3:** organizar y filtrar los estudios originales por relevancia.
- **Paso 4:** seleccionar y convertir las estadísticas descriptivas de la medida de valor económico a una misma unidad de medida en paridad de poder adquisitivo.
- **Paso 5:** seleccionar las variables independientes de características de los sitios de estudio y la metodología aplicada.
- **Paso 6:** realizar la regresión de meta-análisis. El propósito es explicar la variación de la variable dependiente a través de las características de los estudios.
- **Paso 7:** levantar información del sitio de política de las variables relevantes.
- **Paso 8:** predecir la medida de valor para el sitio de política.
- **Paso 9:** agregar los valores estimados.

Para la selección de estudios se utilizó la base de datos TEEB Valuation Data Base del trabajo de Van der Ploeg y col. (2010) en *The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB)* y la base de datos EVRI (Environmental Valuation Reference Inventory). En estas bases se alojan datos de estudios globales que incorporan los valores de la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas para la toma de decisiones.

De acuerdo con el procedimiento propuesto en el Paso 4, es necesario obtener los valores de las disponibilidades a pagar considerando el poder de paridad adquisitivo -PPA- del país de

estudio y el de política. Existen diversas maneras para estimar la PPA. Los dos enfoques más conocidos son el método GK y el método EKS.

El método GK fue propuesto por Geary (1958), y Khamis (1972), Este método consiste en la solución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\pi_n = \sum_{k=1}^K \left[\frac{q_n^k}{\sum_{j=1}^K q_n^j} \right] \left[\frac{p_n^k}{P^k} \right]; n = 1, \dots, N \quad (1)$$

$$P^k = \frac{p^k q^k}{\pi q^k}; k = 1, \dots, K \quad (2)$$

Donde $\pi \equiv [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N]$ es el vector de precios de referencia promedio GK para los n componentes; P^1, \dots, P^K son PPA agregadas para los K países. Se debe fijar $P^1 = 1$, de modo que k = 1 es el país base, para encontrar una solución única a las ecuaciones (Epstein & Marconi, 2014).

El método EKS o método GEKS⁶ fue propuesto por Éltető y Köves (1964) y Sculz (1964). Esta técnica utiliza las matrices de gasto y de PPA a nivel de componentes, que incluyen a todos los países involucrados y toma como fijos los gastos por componentes del país base b, para calcular los Índices de precios de Laspeyres, utilizando como precios las PPA provenientes de la matriz. Esto se repite para todos los posibles países base. De esta forma, se tiene una nueva matriz de Índices de Laspeyres. Luego, se traspone la inversa de la matriz de Laspeyres para calcular la matriz de Índices Paasche. Posteriormente, se calculan los índices de Fisher como el promedio geométrico de los Índices de Laspeyres y Paasche para cada una de las celdas de la matriz. Las paridades a nivel agregado para un país k, tomando al país b como base, se pueden calcular a través del promedio geográfico de los Índices de Fisher del país k con respecto a todos los posibles países base, lo que equivale a calcular los promedios geométricos de las columnas de la matriz de Índices de Fisher. De esta forma se obtiene una PPA multilateral para cada uno de los países, a la que se denomina PPA_k . A partir de estas paridades, se puede obtener la PPA para un país k con el país b como base. El Banco Mundial utiliza el enfoque EKS para agregar las PPA; mientras que la Universidad de California, Davis y la Universidad de Groningen, en su base de datos llamada Penn World Table – PWT utiliza el enfoque GK (Epstein & Marconi, 2014).

La PWT ha sido una fuente estándar para comparar el PIB real entre países y a lo largo del tiempo. Actualmente, la versión más actualizada es la 10.0 y cubre 183 países entre los años 1950 y 2019. Para construir los PPA, PWT usa los precios recopilados entre países en años de referencia

⁶ Porque se considera que fue concebido originalmente por Gini (1924, 1931).

por el Programa de Comparaciones Internacionales (ICP, por sus siglas en inglés), aunque en la actualización del 28 de enero de 2021 reemplazaron los puntos de referencia de ICP para los años 1996 y 2005 con puntos de referencia (o benchmark) de Eurostat y la OCDE siempre que estén disponibles, lo que resuelve los picos en los niveles de precios de varios países europeos (especialmente GBR) y revisa las tasas de crecimiento de los niveles de precios entre 1985 y 1996 para varios países de la OCDE. (Feenstra, 2015).

Por su parte, el Banco Mundial cuenta con series de PPA a nivel del PIB. De acuerdo a la metodología, estas series están calculadas usando como año de referencia el año 2005, para aquellos países que participaron en la Ronda 2005 del PCI. El uso de las PPA del Banco Mundial tiene la ventaja de que, al utilizar el enfoque EKS, se evita el efecto Gerschenkron, es decir, que la participación relativa de cada país en el agregado regional no depende del país base elegido. Además, para imputar las PPA de las economías no participantes en el PCI, se utiliza dos modelos de regresión, uno basado en el índice de nivel de precios (IPL) para el PIB y el otro basado en el IPL para el gasto de consumo individual de los hogares. Estas regresiones se estiman conjuntamente con una “regresión aparentemente no relacionada”. Las variables explicativas son el PIB per cápita en dólares estadounidenses basado en tipos de cambio de mercado, importaciones como porcentaje del PIB, exportaciones como porcentaje del PIB y la tasa de dependencia por edad.

Existen otras fuentes para calcular las PPA, como la Agencia Central de Inteligencia (CIA, por sus siglas en inglés) de EEUU. Sin embargo, este método no se usará en este trabajo ya que, según (Epstein & Marconi (2014), la disponibilidad de información metodológica sobre las estimaciones es escasa y sus datos y metodología no están divulgados universalmente.

Epstein & Marconi (2014), en un estudio realizado para la CEPAL, encontraron que las diferencias entre los valores de las PPA calculadas por el Banco Mundial y las estimadas por PWT son significativas. Sin embargo, siguiendo a estos autores, este trabajo utiliza las PPA del Banco Mundial, ya que se considera como una referencia mundial para dichas estimaciones. Así, el ajuste por PPA, se realiza, tomando como base los índices de precios del sitio de estudio y utilizando las tasas de PPA del Banco Mundial. Además, se ajustan los valores al año 2021, utilizando el índice de precios al consumidor – IPC de Colombia, como lo sugieren Lindhjem y Navrud (2008) y Ready y Navrud (2006). Para ello, se utiliza la siguiente ecuación:

$$VE(PPA)_{2021} = VECN_t \left(\frac{FACTOR(PPA)_{Política,t}}{FACTOR(PPA)_{Estudio,t}} \right) \left(\frac{IPC_{Estudio,2021}}{IPC_{Estudio,t}} \right) \quad (3)$$

Donde:

$VE(PPA)_{2021}$: Es el valor económico del servicio ambiental de captura de carbono en \$ COL por Ha.

$VECN_t$: El valor económico del sitio de estudio para el año t en \$UM por Ha.

$FACTOR(PPA)_{Política,t}$: Factor de conversión para Colombia PPA, PIB (UM para \$ precios internacionales en el año de estudio t.

$FACTOR(PPA)_{Estudio,t}$: Factor de conversión para el país de estudio PPA, PIB (UM para \$ precios internacionales en el año de estudio t.

$IPC_{Estudio,2021}$: Índice de precios al consumidor para Colombia en el periodo actual.

$IPC_{Estudio,t}$: Índice de precios al consumidor para Colombia en el año de estudio t.

La ecuación (3) permite homogeneizar los resultados de los valores económicos encontrados en estudios internacionales en términos de PPA para Colombia y, de esta manera, se estima un valor económico del servicio de almacenamiento de carbono válido. No obstante, una de las debilidades de esta metodología para este servicio ambiental de captura de carbono, es la baja cantidad de estudios disponibles. En la siguiente sección se presentan los resultados de aplicar el método propuesto y se establece la aproximación del CSC para Colombia.

3 Resultados

La base de datos para la aplicación del metaanálisis se estructuró con 32 observaciones, 7 variables cuantitativas y 6 cualitativas, resultado de la búsqueda y caracterización de estudios internacionales de valoración económica del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono en la plataforma TEEB Data Base y la base de datos EVRI. Los estudios seleccionados tienen como medida de bienestar la disponibilidad a pagar (DAP) por hectárea al año para diversos ecosistemas que prestan el servicio ambiental de secuestro de carbono. La descripción de las variables se presenta en la **Tabla 1** y la base de datos estructurada se presenta en el Anexo 1.

Tabla 1.

Descripción de las variables

Nombre de la variable	Descripción
Ecosistema	Clasificación de Ecosistema según Van der Ploeg et al. (2010)
País	Nombre del país según BM
Nivel_ingreso	Grupo de Ingresos según BM
Densidad_pob	Densidad de población presentada por el BM
Estado_proteccion	Nivel de protección del área de estudio
Escala	Indica la escala de estudio
Región	La Región en la que el país está clasificado por el BM
Continente	Continente del sitio de estudio
Año	Año de valoración
Método	Método de valoración
Imp_eco	Grado de importancia de la captura de carbono del ecosistema según Universidad del Sur de Dinamarca (Svennevig, 2018)
area	Área en hectáreas del sitio de estudio (donde se realiza la valoración económica)
DAP	Disponibilidad a pagar por Ha al año en \$ COP

A partir de los valores económicos obtenidos de cada estudio, utilizando la ecuación (3) se obtuvo los valores en paridad de poder adquisitivo para Colombia, a pesos del 2021 por hectárea al año, de la importancia en bienestar del servicio ecosistémico de la captura de carbono. Los valores obtenidos se encuentran en unidades monetarias que consideran la capacidad adquisitiva de Colombia comparada con la del país del sitio de estudio. La medida estadística de la mediana indica un valor central de \$21.424 pesos COL por ha/año y la desviación estándar con un valor por encima de la media señala una alta dispersión en los valores encontrados. La media de las observaciones de la DAP es de \$260.286 pesos COL por hectárea al año (Ver Tabla 2). Esta es la variable dependiente del modelo de regresión que se desea estimar.

Tabla 2

Resumen estadísticas de la variable DAP

	N	Media	SD	Min	Q1	Mediana	Q3	Max
DAP	32	\$260.286	\$614.160	\$3	\$2.073	\$21.424	\$199.429	\$3.198.299

La distribución de las observaciones por tipo de ecosistema, escala de estudio, metodología de valoración económica empleada, continente y nivel de ingresos del sitio donde se desarrolló el trabajo de investigación se presentan en la Figura 3, Figura 1, Figura 2, Figura 6 y Figura 7.

Los estudios valoraron el servicio de almacenamiento de carbono en una variedad de ecosistemas marinos, costeros y continentales. Se evidencia que el ecosistema que más se valoró en los estudios disponibles, es el de bosque templado, seguido de los bosques tropicales, los humedales y los manglares; mientras que el menos valorado es la agrosilvicultura. Además, la principal escala de valoración del servicio ecosistémico de captura de carbono es a nivel país, seguido de las valoraciones locales.

El método directo de valoración económica más utilizado es el precio de mercado basado en las transacciones de los bonos de carbono y el valor del impuesto al carbono de cada país, seguido de las metodologías basadas en cuantificar los costos evitados, costos de abatimiento y costos de mitigación. Por su parte, la técnica de transferencia de beneficios es el método indirecto más utilizado en la literatura revisada, esto se debe a su característica de ser más eficiente en términos de la implementación, por su bajo costo y menor tiempo.

Figura 3

Distribución porcentual de los diferentes tipos de ecosistema en los sitios de los estudios

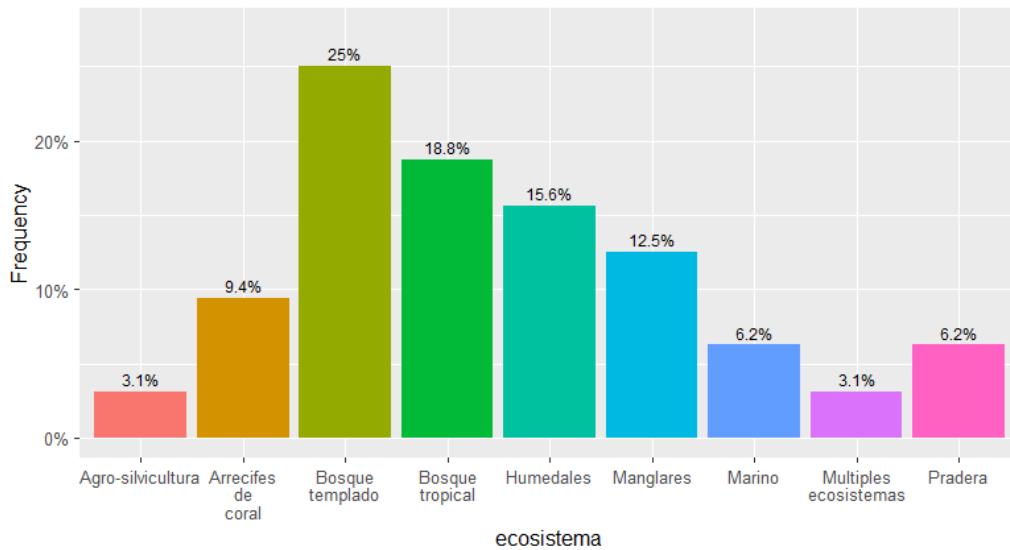


Figura 4

Distribución porcentual de la escala de los estudios (estudios que miden la DAP a pagar por el secuestro de carbono a nivel local, de municipalidad, de distrito, de región y de país)

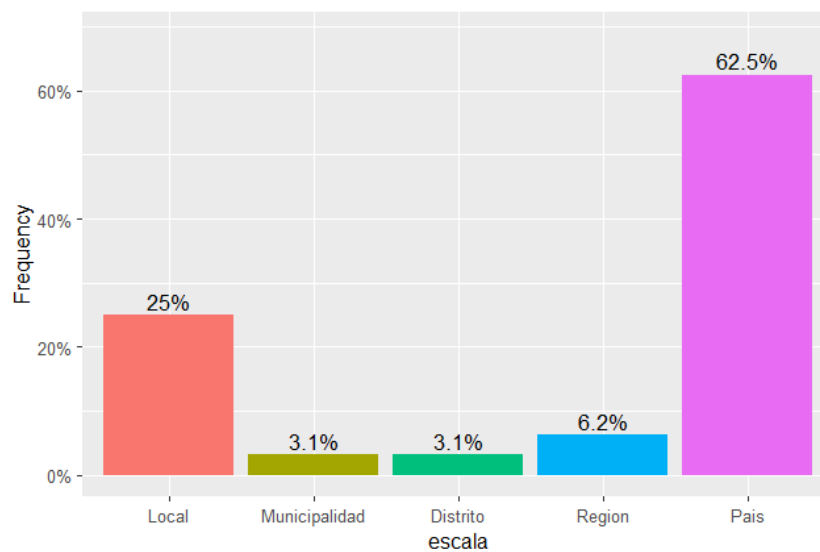


Figura 5

Distribución porcentual de los métodos utilizados en los estudios para calcular la DAP

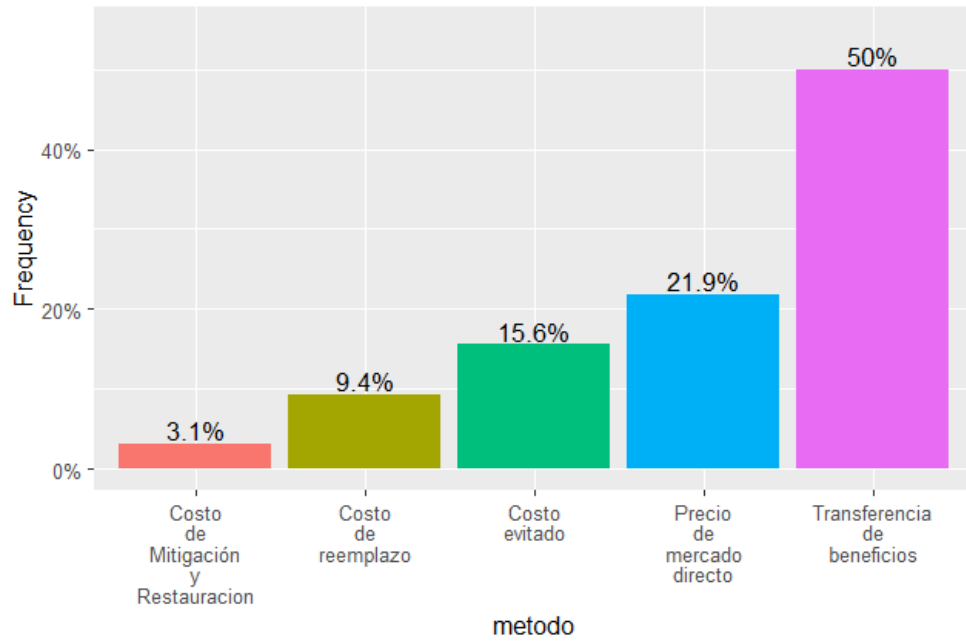


Figura 6

Distribución porcentual de la localización de los estudios a nivel continente

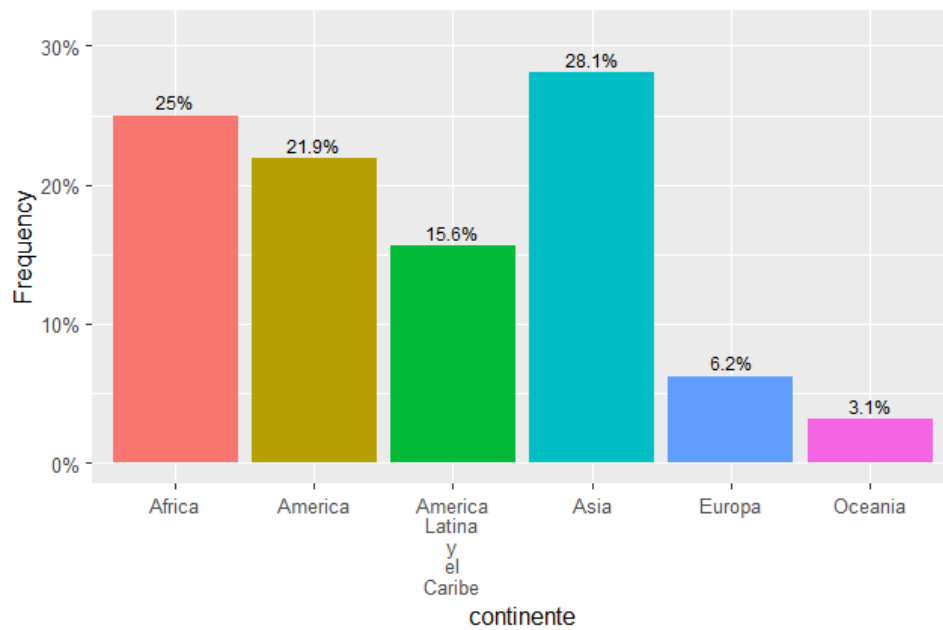
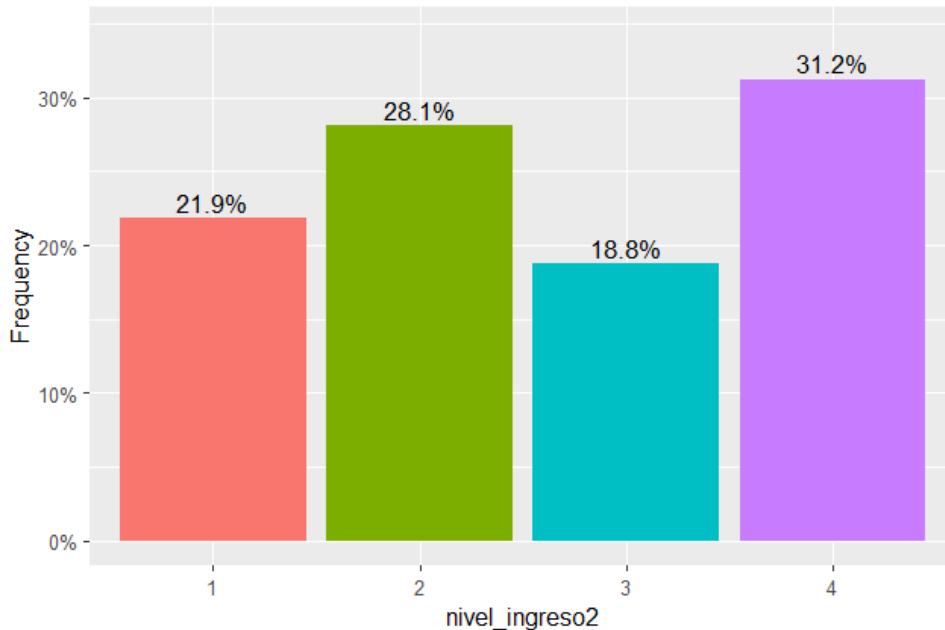


Figura 7

Distribución porcentual de los niveles de ingreso de los sitios para los cuales fueron aplicados los estudios.



La mayor parte de las valoraciones de DAP se presentaron en Asia, con el 28,1%, seguido de África (25%), las Américas (21,9%) y Latinoamérica y el Caribe (15,6%). Adicionalmente los países para los cuales se realizaron los estudios son principalmente de ingreso alto con el 31,2%, seguido de los países con ingreso medio bajo (28,1%) y con ingreso bajo (21,9%); mientras que los países con un ingreso medio alto (18,8%) presentan la menor participación dentro de los estudios disponibles. Sin embargo, las diferencias entre el número de estudios para países con diferentes niveles de ingresos no son significativamente altas.

Al desagregar los datos, únicamente para América Latina y el Caribe, que son países similares a Colombia, en cuanto al nivel de ingresos, en promedio, en la Figura 8 se observa que, en los estudios disponibles, estos países tienen una mayor DAP, en promedio, por ecosistema de bosque tropical, seguido de bosque templado. Estos países, entre los que se encuentran Brasil y México, utilizaron el método de transferencia de beneficios para realizar sus estimaciones, las cuales, principalmente se hicieron a una escala de país (ver Figura 9).

Figura 8

DAP (en logaritmos) por los diferentes ecosistemas (\$ COP) en América Latina y el Caribe

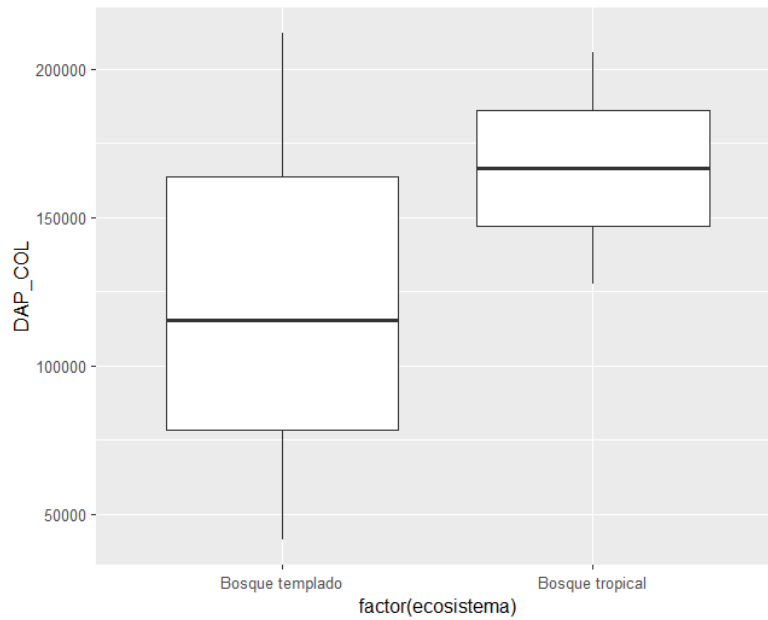
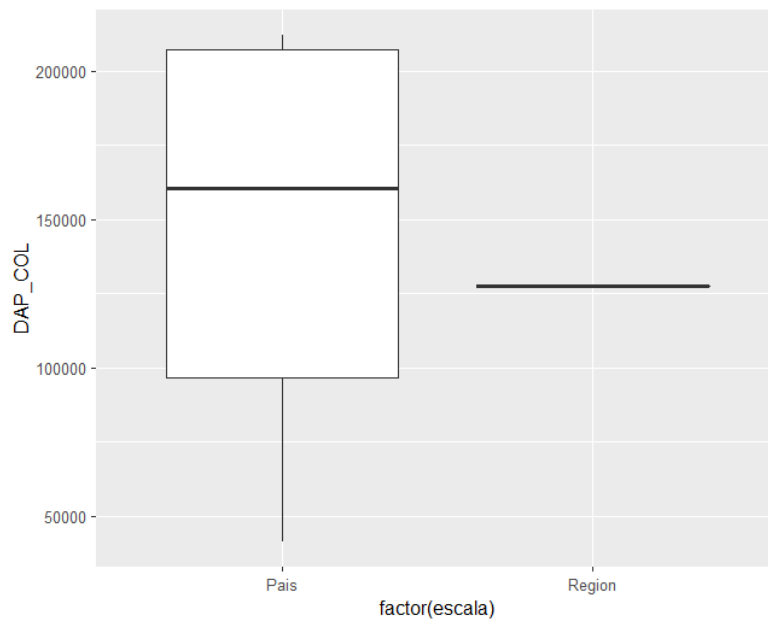


Figura 9

DAP (en logaritmos) de los estudios realizados en América Latina y el Caribe por escala a la fue estimada la DAP (a nivel local, de país, región, entre otras)



Antes de realizar la regresión del metaanálisis, se estudia la relación que existe entre variables con el fin de identificar cuáles pueden ser los mejores predictores para el modelo, el tipo de relación que existe entre las variables y para identificar colinealidad entre predictores. La Figura

10 representa la distribución de cada variable mediante diagramas de dispersión y los valores de correlación para cada par de variables. Del análisis se obtiene que la variable *DAP* muestra una distribución exponencial y por tanto una transformación logarítmica haría más normal su distribución, como en la Figura 11. Las variables que tienen mayor relación lineal con la valoración económica son el nivel de ingresos ($r = 0,199$), si el estudio es realizado con el método de transferencia de beneficios ($r = -0,201$) y el estatus de protección ($r = -0,249$).

Entre las variables explicativas se encuentra baja correlación por lo que se puede evaluar la inclusión de todas en el modelo. La regresión de metaanálisis inicialmente estimada es la presentada en la ecuación (4) que tiene como variable dependiente la transformación logarítmica de la disponibilidad a pagar ($LDAP_i$) en función de las variables de clasificación de ingreso del país ($nivel_ingreso_i$), la escala del estudio ($scala_i$), una variable dummy si el estudio utilizó la transferencia de beneficios como método ($metodo_tb_i$), el estatus de protección del sitio de estudio ($estado_proteccion_i$), el nivel de densidad de la población ($densidad_pob_i$), el grado de importancia del ecosistema, medido por la capacidad para capturar CO_2 (imp_eco_i) y el término error (ε_i).

$$LDAP_i = \beta_0 + \beta_1 nivel_ingreso_i + \beta_2 scala_i + \beta_3 metodo_tb_i + \beta_4 estado_proteccion_i + \beta_5 densidad_pob_i + \beta_6 imp_eco_i + \varepsilon_i \quad (4)$$

Considerando la baja significancia individual y el bajo R^2 ajustado del modelo de la ecuación (4), se procede a encontrar un mejor modelo seleccionando los mejores predictores a través de la función step en el software R, que permite elegir un modelo por el criterio AIC en un algoritmo paso a paso. De esta manera se obtuvo que el modelo con mejor ajuste es el presentado en la ecuación (5), que corresponden a las variables inicialmente encontradas con mayor relación lineal con el valor económico DAP

$$LDAP_i = \beta_0 + \beta_1 nivel_ingreso_i + \beta_2 estado_proteccion_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

Al sensibilizar por los criterios BIC, Cp y R^2 ajustado, se tiene que el BIC y el Cp recomiendan la misma especificación que el AIC. El criterio de R^2 ajustado, por su parte, muestra que la mejor especificación es

$$LDAP_i = \beta_0 + \beta_1 nivel_ingreso_i + \beta_2 estado_proteccion_i + \beta_3 densidad_pob_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

Sin embargo, con este modelo se tiene heterocedasticidad en los errores. Dado lo anterior, se opta por elegir la especificación que recomiendan los criterios BIC, Cp y AIC, como en la ecuación (5).

Figura 10

Correlación entre las variables del modelo

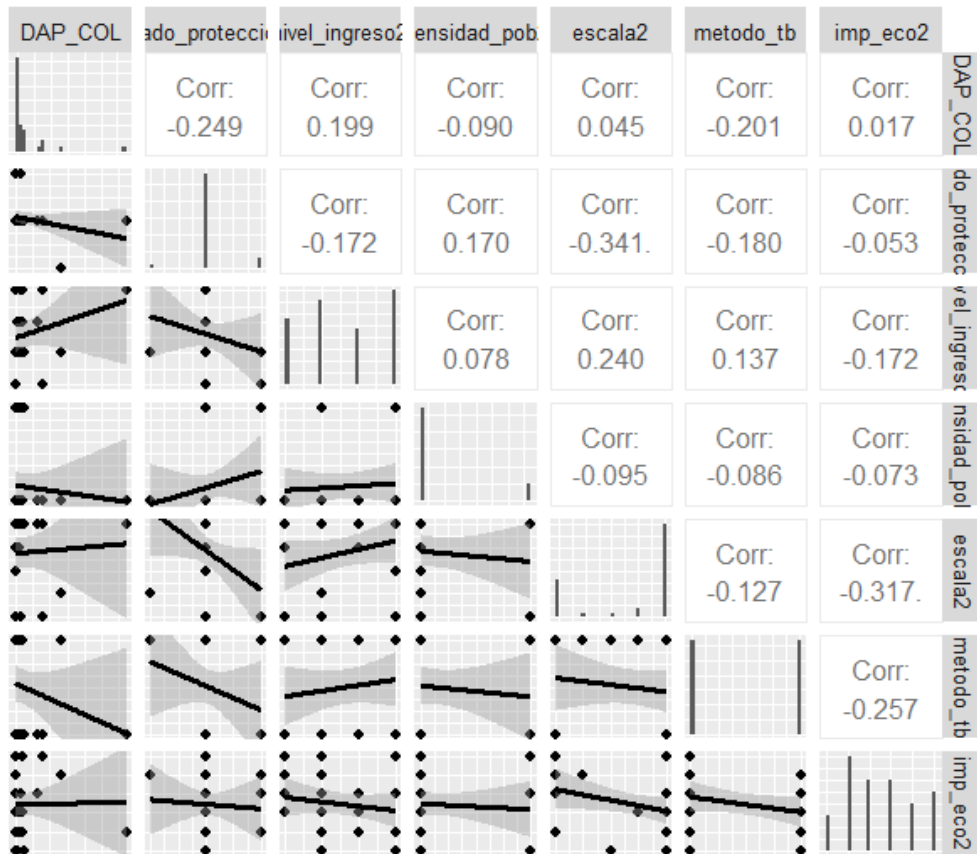
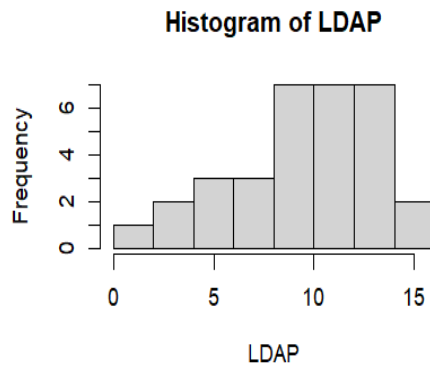


Figura 11*Histograma de la DAP (en logaritmos)*

Al modelo de la ecuación (5) se le realizaron las pruebas estadísticas gráficas de normalidad y el test Shapiro- Wilk normality, con lo cual se confirma el cumplimiento del supuesto de normalidad en los errores. Mediante el test Breusch – Pagan, se confirma que se cumple la propiedad de homoscedasticidad.

Los resultados del modelo robusto se presentan en la Tabla 3. Las variables son estadísticamente significativas y el modelo presenta una capacidad explicativa del 21% de la variabilidad de los valores económicos del SE. Si bien la capacidad explicativa parece ser baja, según Anderson *et al.* (2001), para fines prácticos, con datos en las ciencias sociales, valores tan pequeños de R^2 suelen considerarse útiles. Los coeficientes de las variables corresponden a semielasticidades de la forma: $\Delta\%Y = 100\beta_i(\Delta X_i)$, e indican que, si el resto de las variables se mantienen constantes, un aumento en la clasificación del país en el nivel de ingreso aumenta el valor económico de la captura de carbono en un promedio de 95% y un aumento en un nivel de estatus de conservación reduce la valoración del servicio en promedio en 374%. Estos resultados, al igual que lo presentado en la Figura 12, Figura 13 y Figura 14, implican que el valor del CSC, medido a través de la importancia del servicio ambiental de captura de carbono, depende de la clasificación de ingreso alcanzado por el país. Se espera que los países en la categoría de bajos ingresos, presenten menores disponibilidades a pagar que los países con categorías más altas de ingreso. Este resultado corresponde con la visión de bien de lujo de los bienes ambientales y las explicaciones propuestas a la hipótesis de la existencia de una relación de U invertida entre la degradación ambiental y el crecimiento económico. Lo anterior se conoce como la curva de Kuznets medioambiental, propuesta por Panayotou (1994), la cual establece que una vez la

población haya alcanzado un ingreso suficiente para satisfacer las necesidades básicas y acumule riqueza, se encuentra mejor preparada para afrontar el daño ambiental provocado por el crecimiento económico; así, estaría dispuesta a invertir los recursos en mitigación, control y abatimiento de las emisiones de carbono. Por su parte, la relación encontrada con el estado de protección del ecosistema donde se desarrolló el estudio original sugiere que, en los territorios donde los niveles de protección ambiental son bajos, hay una mayor disponibilidad de realizar aportes económicos para asegurar la prestación del servicio ambiental.

Tabla 3

Meta-regresión del valor económico del SE de Almacenamiento de Carbono

Dependent variable:									
LDAP									
estado_proteccion2	-3.740* (2.024)								
nivel_ingreso2	0.949* (0.545)								
Constant	14.850*** (4.183)								
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: left; padding: 5px;">Observations</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;">32</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left; padding: 5px;">R2</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;">0.258</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left; padding: 5px;">Adjusted R2</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;">0.207</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left; padding: 5px;">Residual Std. Error</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;">3.067 (df = 29)</td> </tr> </table>		Observations	32	R2	0.258	Adjusted R2	0.207	Residual Std. Error	3.067 (df = 29)
Observations	32								
R2	0.258								
Adjusted R2	0.207								
Residual Std. Error	3.067 (df = 29)								

Note: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Figura 12

Relación entre la DAP (en logaritmos) y el nivel de ingreso

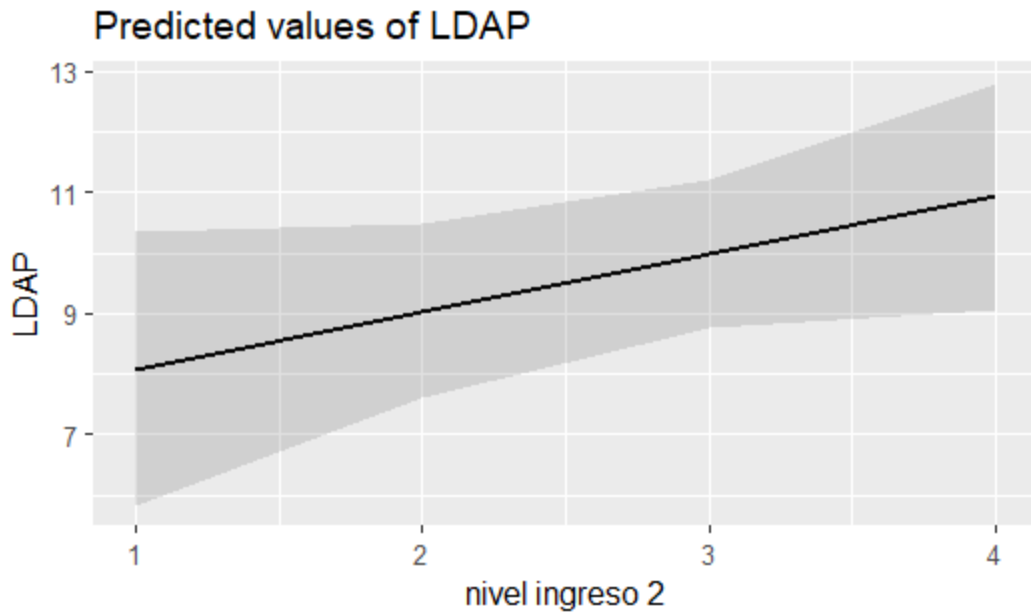


Figura 13

Relación entre la DAP (en logaritmos) y el estado de protección del ecosistema.

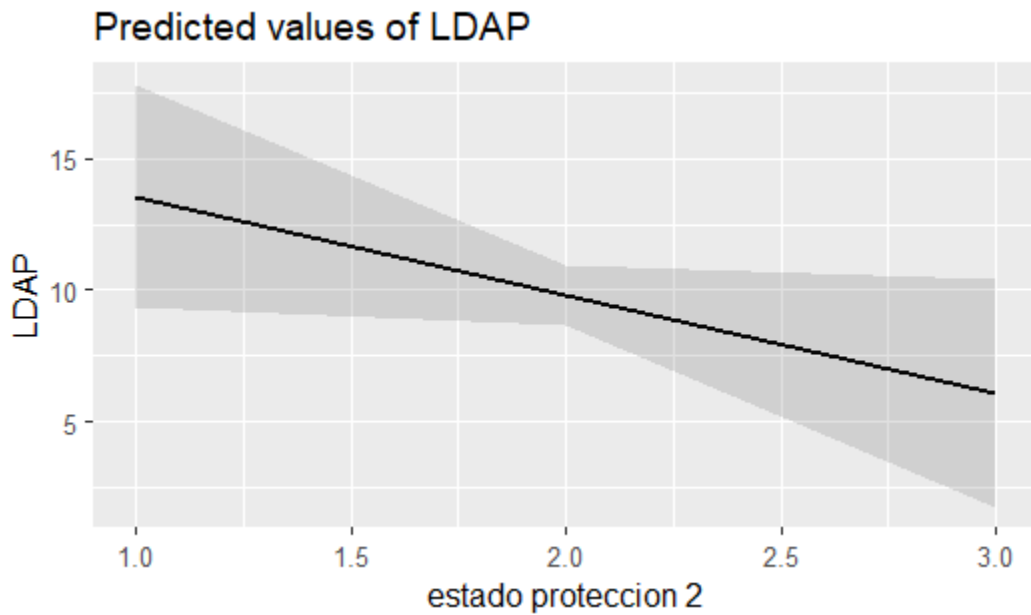
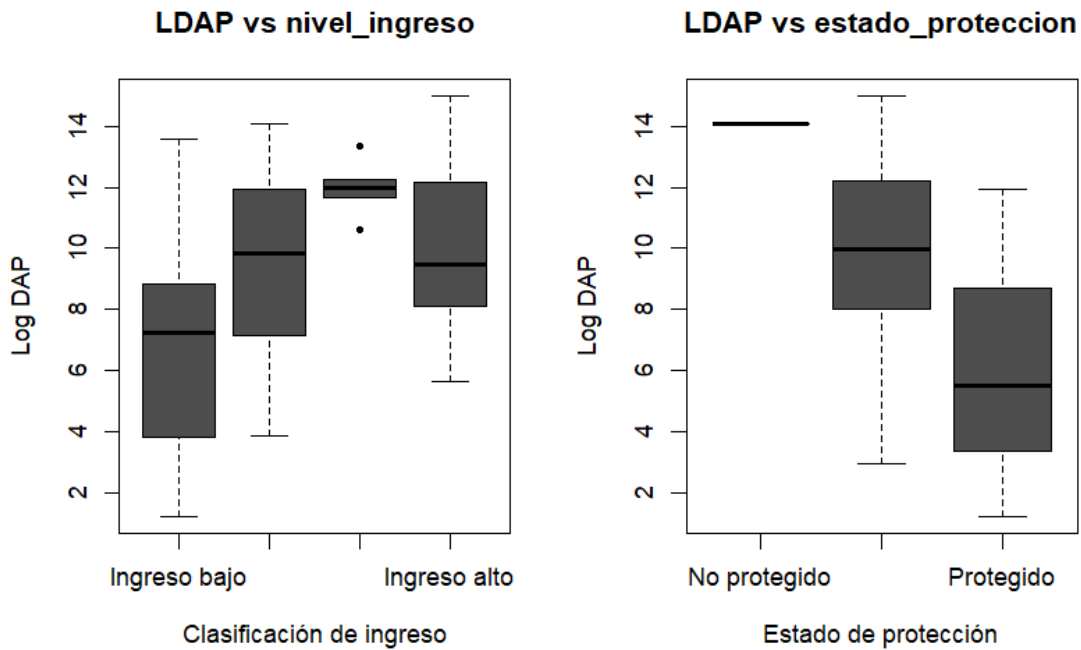


Figura 14

Relación entre el nivel de ingreso y la DAP (panel izquierdo) y entre el grado de protección de los ecosistemas y la DAP (panel derecho)



Obteniendo el valor exponencial de los valores predichos del modelo robusto de metaanálisis, se encuentran los valores económicos estimados de la transferencia de beneficios. El resultado presentado en la Tabla 4, evidencia que el indicador monetario del CSC, medido por el valor de importancia social del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono, tiene un valor medio de \$43.924 pesos COL por hectárea al año para el 2021 y presenta un intervalo entre \$4.100 y \$70.680 pesos COL dados por los percentiles 25 (P25) y 75 (P75), lo cual implica una alta dispersión de los datos debido al reducido número de observaciones. Dada la diferencia entre la media y la mediana, lo más recomendable es utilizar el valor de la mediana como una medida de tendencia central más conservadora que informa de mejor manera el punto central de la distribución de la DAP. Así el percentil 50 de la distribución de la disponibilidad a pagar por el servicio ecosistémico de captura de carbono tiene un valor de \$27.361 pesos COL por hectárea al año para el 2021.

Tabla 4

Resumen estadísticas de la variable DAP estimada

	N	Media	SD	Min	Q1	Mediana	Q3	Max
DAP estimada	32	\$43.924	\$78.755	\$97	\$4.100	\$27.361	\$70.680	\$445.862

De acuerdo con Tooichi (2018), el potencial promedio de los bosques a nivel mundial para secuestrar carbono es de 1,9 toneladas de CO_2 por hectárea al año. Este promedio es estimado para bosques de arce, haya y abedul, con una edad de 25 años. Al usar este indicador con el resultado anterior, se tiene que la DAP por el servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono, tiene un valor medio de \$14.400 pesos COL por tonelada de CO_2 para el 2021.

Por su parte, Pardo *et al.* (2021) estiman que el potencial promedio de los bosques amazónicos de Colombia para secuestrar carbono es de 2,2 toneladas de CO_2 por hectárea al año, con el supuesto de que la tasa de deforestación se mantiene constante en los próximos 20 años. Este promedio es estimado para bosques, potreros con árboles y plantaciones de caucho con especies como: palma guajo, abarco, comino, cedro, roble, achapo, carbón, guamo, granadillo, ahumado, amarillo real, laurel comino, tehobroma de monte y balso, ubicadas en Caquetá, Colombia. Utilizando este indicador con el resultado del modelo de regresión, se tiene que la DAP por el servicio ecosistémico de captura de carbono, tiene un valor medio de \$12.436 pesos COL por tonelada de CO_2 para el 2021.

Teniendo en cuenta que los daños por las emisiones de carbono a la atmósfera no se producen al mismo tiempo que se generan las emisiones, se calcula el valor presente neto (VPN) de la DAP estimada, como lo recomienda el ANLA, en un horizonte temporal de 20 años (mediano plazo) con una tasa de descuento del 4% y, en un horizonte de 30 años (largo plazo) con una tasa del 2%, como se muestra en la Tabla 5 (Castro & Casallas, 2018).

Tabla 5

VPN de la DAP (\$27.361 pesos COL /ha/año) con tasas de descuento del 2% y el 4% para distintos niveles de captura de carbono de los bosques

Autor	Potencial promedio de bosques para capturar CO_2 (ton CO_2 /ha/año)	Tasa descuento ANLA (2018)	Tiempo (años)	VPN (pesos COL / ton CO_2)
Tooichi (2018)	1,9	2%	30	\$ 353.970
		4%	20	\$ 214.792
Pardo <i>et al.</i> (2021)	2,2	2%	30	\$ 305.701
		4%	20	\$ 185.502

Fuente. Elaboración propia, con base en Tooichi (2018), Pardo et al. (2021) y Castro y Casallas (2018).

Dado lo anterior, al utilizar el indicador de Tooichi (2018), se tiene que el CSC medido como la importancia que le da la sociedad al servicio ecosistémico de captura de carbono tiene un valor presente neto de \$353.970 pesos COL por tonelada de CO_2 , si se usa una tasa de descuento del 2% en un horizonte de 30 años; mientras que, en un horizonte de 20 años, con una tasa del 4%, el VPN del CSC es de \$214.792 pesos COL por tonelada de CO_2 . Por su parte, al utilizar el indicador de Pardo *et al.* (2021) para bosques amazónicos colombianos, se tiene que el VPN del CSC es de \$ 305.701 pesos COL por tonelada de CO_2 , con una tasa del 2% y un horizonte de 30 años; mientras que, con una tasa del 4% y un horizonte temporal de 20 años, el CSC es de \$185.502 pesos COL por tonelada de CO_2 .

En síntesis, el valor medio del CSC, medido en términos de bienestar para la sociedad del servicio ecosistémico de captura de carbono, oscila entre \$185.502 y \$353.970 pesos COL por tonelada de CO_2 , dependiendo de los supuestos que se utilicen. Este rango de valores es superior al impuesto al carbono actual de Colombia de \$18.829 pesos COL por tonelada de CO_2 y, está más acorde con lo establecido por el informe Quinet, cuya filosofía fue recogida en el informe Rocard sobre la tasa de carbono. Este informe estimó un CSC de 45 euros por tonelada de CO_2 para el 2010 y 100 euros para el 2030, para llegar a una horquilla de entre 150 euros y 350 euros en 2050 (Tirole, 2017). Suecia y Noruega cuentan con impuestos al carbono al 2021, que están más o menos en línea con estas estimaciones (\$USD 137,2 y un rango entre \$USD 3,9 y \$USD 69,3, respectivamente) con coberturas del 40% y 66% de las emisiones, respectivamente).

4 Discusión y conclusiones

Las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera producen un cambio climático que afecta negativamente a la economía y al bienestar social. Dichos costos no son tenidos en cuenta en los precios de los bienes de las empresas contaminadoras, por lo que la sociedad no es compensada por estos daños. Por tanto, es importante identificar y establecer un CSC que permita internalizar los costos sociales y económicos de los daños ocasionados por el cambio climático. En ese sentido, el CSC es un instrumento útil en la construcción de políticas públicas del cambio climático y desarrollo sostenible, al reducir los niveles de incertidumbre en las inversiones y en el ahorro, lo cual es fundamental para la innovación y la sustitución de bienes y servicios intensivos en carbono. Este indicador tiene gran utilidad en la evaluación de proyectos de energía que buscan una transición energética hacia el uso de tecnologías de generación más limpias y, en general, se puede usar en proyectos de evaluación económica, social y ambiental de distintas tecnologías; en el licenciamiento ambiental de proyectos, en programas de mitigación del cambio climático y puede complementar o reforzar políticas públicas para detener la deforestación.

Dada la importancia de establecer el verdadero costo para la sociedad de las emisiones de carbono, este trabajo busca estimar un indicador del CSC, medido a través de la importancia económica y social del servicio ecosistémico de captura de carbono, identificado en la literatura, a precios de 2021. Para esto, se emplean métodos del metaanálisis y la técnica de transferencia de beneficios. La transferencia de beneficios es una herramienta que implica extrapolar o transferir el beneficio económico estimado de distintos sitios de estudio al sitio de interés de la política y, es apropiado cuando los fondos, tiempo o personal son insuficientes, siempre y cuando los sitios de estudio sean similares al sitio de la política. Esta metodología es una buena alternativa para aproximarse al valor económico de la importancia social del carbono y prueba de ello es que el 50% de los estudios encontrados utilizaron dicha técnica. Sin embargo, se debe tener en cuenta el uso de análisis complementarios como las curvas de costo de abatimiento (MAC). Además, es importante resaltar que la recolección de información primaria es inevitable para evaluar los impactos ambientales de proyectos y políticas con posibles consecuencias irreversibles sobre poblaciones vulnerables y ecosistemas estratégicos.

El uso de la técnica de Transferencia de Beneficios con un modelo de metaregresión permite realizar un análisis causal entre las características de los sitios de estudio y la valoración económica

del servicio ambiental. En este sentido, un resultado importante de este trabajo es que el valor del CSC, medido a través de la importancia del servicio ambiental de captura de carbono, tiene una relación directa con la clasificación de ingreso alcanzado por el país e inversa con el estado de protección del ecosistema donde se desarrolló el estudio original. Otro punto a destacar es que los valores encontrados con la metaregresión presentan valores promedio estimados menores y con menor dispersión (ver Tabla 4) que los encontrados en las medidas de tendencia central de los datos observados (ver Tabla 2), lo que indica un menor sesgo en utilizar los valores de la metaregresión para la transferencia de valores en la toma de decisiones.

El valor económico estimado para Colombia oscila entre \$185.502 y \$353.970 pesos COL por tonelada de CO_2 , dependiendo de la tasa de descuento y del índice de captura de carbono de los bosques a utilizar. Este rango es superior al valor del impuesto al carbono actual de \$18.829 pesos COL. Dichas estimaciones sugieren que el valor del impuesto al carbono en Colombia es bajo y no iguala al verdadero costo para la sociedad de las emisiones de CO_2 a la atmósfera. Sin embargo, debido al bajo número de observaciones, los datos utilizados en este trabajo presentan una alta dispersión, por lo que los resultados aún son inciertos. En la medida en que surjan nuevas investigaciones que estimen la DAP por el servicio ambiental de captura de carbono y se incorporen como nuevas observaciones al modelo, los resultados serán más precisos.

Si bien como lo afirma la CEPAL (2019), este valor económico que se desprende de la síntesis de la literatura es insuficiente para resolver el desafío del cambio climático, es una aproximación al CSC para Colombia, que disminuye el nivel de incertidumbre de las diversas estimaciones existentes en la literatura mundial y brinda información a los tomadores de decisión sobre la importancia social en términos económicos de conservar o restaurar ecosistemas, cuya funcionalidad preste el servicio ambiental de captura de carbono. Esto contribuye a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y, por ende, reduce los costos sociales de los mismos. Sin embargo, en Colombia, existe una elasticidad precio de la demanda de energía y de combustibles como la gasolina, que es inelástica, debido a la escasez de bienes sustitutos. Por esta razón, se recomienda establecer precios diferenciados del CSC, con el fin de preservar la competitividad regional y minimizar los efectos negativos que se podrían presentar en la distribución del ingreso y en el bienestar.

Referencias bibliográficas

- Ackerman, F & Munitz. (2012). Climate damages in the FUND model: A disaggregated analysis. *Ecological Economics*, 77, 219-224.
- Allegue, Y. (2014). Principales elementos divergentes en los modelos de evaluación integrada del impacto del cambio climático. *Economía y Desarrollo*, 152(2), 107-121. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0252-85842014000200007
- Anderson, D., Sweeney, D y Williams, T. (2001). *Estadística para administración y economía* (10a ed.). México: Thomson. <https://www.upg.mx/wp-content/uploads/2015/10/LIBRO-13-Estadistica-para-administracion-y-economia.pdf>
- Castro, D & Casallas, Y, (2018). Guía para la definición de la Tasa de Descuento: Aspectos relevantes en el marco del Licenciamiento Ambiental en Colombia. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA https://www.anla.gov.co/01_anla/documentos/proyectos/02_transformacionales/03_nuevo_modelo/Documentos/04-04-2022-anla-definici%C3%B3n_tasa%20de_descuento.pdf
- Banco Mundial. (2021). *State and Trends of Carbon Pricing 2021*. Washington, DC: World Bank. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620> License: CC BY 3.0 IGO
- Barrientos, A. (2020). Contaminación por emisiones de CO_2 en el Modelo de Crecimiento Económico de Ramsey-Cass-Koopmans: El Caso de México. [tesis de maestría, Universidad Veracruzana]. <https://www.uv.mx/meae/files/2020/08/Tesis-Barrientos-Cruz-Angel-Rafael.pdf>
- Berrío, M., Arango, M & Botero. (2015). Análisis de los Indicadores de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para Valorar Proyectos de Energía Renovable en Sistemas Eléctricos, Caso de Colombia. *Lámpsakos*, (13), 24–38. <https://doi.org/10.21501/21454086.1496>
- Bergstrom, J. (1996). *Current Status Of Benefits Transfer In The U.S.: A Review*. University of Georgia, Department of Agricultural y Applied Economics.
- Bernal, J., Ojeda, J. (coordinadores), Agudelo, C., Clavijo, F., Durana, C., Granger, C., Osorio, D., Parra, D., Pulido, J., Ramos, J., Rodríguez, D., Sánchez, A., Toro, J. (2022). Impacto macroeconómico del cambio climático en Colombia. *Ensayos sobre Política Económica (ESPE)*, núm. 102, julio, DOI: 10.32468/espe102.
- Brookshire, D & Neill, H. (1992). Benefit transfers: Conceptual and empirical issues. *Water Resources Research*, 28 (3), 651-655. <https://doi.org/10.1029/91WR02590>
- Cartes, F. (2018, 7 y 8 de noviembre). Metodología de Inclusión de Precio Social de Carbono en Proyectos de Inversión Pública [presentación de diapositivas]. Slideshare. https://www.cepal.org/sites/default/files/presentations/metodologia_de_inclusion_de_precio_social_de_carbono_en_proyectos_de_inversion_publica.pdf
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2019). *El costo social del carbono: una visión agregada desde América Latina*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44423/1/S1800462_es.pdf

- Champ, P. A., Boyle, K. J. & Brown, T. C. (2017). *A Primer on Nonmarket Valuation* (P. A. Champ, K. J. Boyle & T. C. Brown, Eds.; Second Edi, Vol. 13). Dordrecht, Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7104-8>
- Clerc, J; Díaz, M & Campos, B. (2013). Desarrollo de una metodología para la construcción de curvas de abatimiento de emisiones de GEI incorporando la incertidumbre asociada a las principales variables de mitigación. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Desarrollo-de-una-metodolog%C3%ADa-para-la-construcci%C3%B3n-de-curvas-de-abatimiento-de-emisiones-de-GEI-incorporando-la-incertidumbre-asociada-a-las-principales-variables-de-mitigaci%C3%B3n.pdf>
- Corredor, A., de la Ossa, M., Henao, L., Joya, S., Montoya, L., Peña, C., Pérez, J., Prada, A., Ortiz, E., Rojas, A., Saavedra, L & Zambrano, M. (2014). Productos analíticos para apoyar la toma de decisiones sobre acciones de mitigación a nivel sectorial: curvas de abatimiento para Colombia. Universidad de los Andes. https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/estudios_de_costos_de_abatimiento/general/General.pdf
- Cortés, G. (2019). Estimación del costo social del carbono emitido por cambio de cobertura a partir de sensores remotos en la reserva bosque oriental de Bogotá. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/23134>
- DIAN. (2022, 31 de enero). Resolución Número (000019). Por la cual se ajustan las tarifas del Impuesto Nacional a la Gasolina y al ACPM, y del Impuesto Nacional al carbono. <https://www.dian.gov.co/normatividad/Normatividad/Resoluci%C3%B3n%20000019%20de%2028-01-2022.pdf>
- Duque, A. (2003). Costos marginales de captura de CO_2 en Colombia [tesis de maestría, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10033/u234395.pdf?sequence=1>
- Epstein, H & Marconi, S. (2014). América Latina y el Caribe: estimación de las series en paridades de poder adquisitivo (PPA) Un ejercicio preliminar para el período 2000-2011. Serie Estudios Estadísticos. CEPAL. https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/35895/S2014047_es.pdf
- Feenstra, R., Robert, I & Marcel, P. (2015). The Next Generation of the Penn World Table. *American Economic Review*, 105(10), 3150-3182, available for download at www.ggdcd.net/pwt
- Gerlagh, R & Liski, M. (2013). Carbon Prices for the Next Thousand Years. CESifo Working Paper Series3855, CESifo Group Munich
- González, A. (2019). Evaluación de la remoción de contaminantes atmosféricos y la captura de carbono por parte de los cerros Nutibara y volador de Medellín. Universidad EIA. https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/2479/GonzalezAlejandra_2019_EvaluacionRemocionContaminantes.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Hanemann, M. (2008). What is the economic cost of climate change?. https://escholarship.org/content/qt9g11z5cc/qt9g11z5cc_noSplash_6cf12ea0872c015f0d130f81e92e87b8.pdf
- IEA. (2022). Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer. Consultado el 22 de octubre de 2022. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>
- IEA. (2020). World Energy Balances: Overview. World. Consultado el 23 de junio de 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/worldBP>.
- BP. (2022). Bp Statistical Review of World Energy 2022. 71st edition. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- Lindhjem, H. & Navrud, S. (2008). How reliable are meta-analyses for international benefit transfers? *Ecological Economics*, 66 (2-3), 425-435. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.10.005>
- Lozano, Y. (2007). Los sumideros de carbono: un análisis de la potencialidad económica en un bosque de manglar del pacífico colombiano. *Revista EIDENAR*. <http://revistaeidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/6/i.htm>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2012). Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia, 2010-2011. Bogotá: Misión BID - CEPAL.
- Murray, Pendleton, Jenkins, & Sifleet. (2011). Green Payments for Blue Carbon Economic Incentives for Protecting Threatened Coastal Habitats (pp. 50): Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (2009). Blue Carbon. A Rapid Response Assessment: United Nations Environment Programme, GRID-Arendal.
- Nordhaus, W. (2016). Revisiting the social cost of carbon. <https://www.pnas.org/content/114/7/1518>
- Nordhaus, W. (2013). Integrated economic and climate modeling.
- OECD, (2018). "The social cost of carbon", in *Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264085169-17-en>.
- Osorio, J. (2006). El método de transferencia de beneficios para la valoración económica de servicios ambientales: Estado del arte y aplicaciones. *Semestre económico*, 9 (18), 19.

- Osorio, J & Correa, F. (2009). Un análisis de la aplicación empírica del método de valoración contingente. *Semestre económico*, 12 (25), 11-30. <http://www.scielo.org.co/pdf/seec/v12n25/v12n25a2.pdf>
- Pardo, Y., Andrade, H., Muñoz, J & Velásquez, J. (2021). Carbon capture in three land use systems in the Colombian Amazonia. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 38(2):111-123. <https://doi.org/10.22267/rcia.213802.160>
- Programa para el medio ambiente de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (s. f.). Mitigación. Consultado el 23 de octubre de 2022. <https://www.unep.org/es/explore-topics/climate-change/what-we-do/mitigacion>
- Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) (s. f.). ¿Qué significa adaptación al cambio climático y resiliencia al clima?. Consultado el 23 de octubre de 2022. <https://unfccc.int/es/topics/adaptation-and-resilience/the-big-picture/que-significa-adaptacion-al-cambio-climatico-y-resiliencia-al-clima#Proceso-de-examen-t%C3%A9cnico-sobre-la-adaptaci%C3%B3n>
- Ready, R. & Navrud, S. (2006). International benefit transfer: Methods and validity tests. *Ecological Economics*, 60 (2), 429-434. <https://econpapers.repec.org/RePEc:eee:ecolec:v:60:y:2006:i:2:p:429-434>
- Rosenberger, R. S. & Loomis, J. B. (2003). Benefit transfer (P. A. Champ, K. J. Boyle & T. C. Brown, Eds.). En P. A. Champ, K. J. Boyle & T. C. Brown (Eds.), *A primer on non-market valuation*. Dordrecht: Kluwer.
- Stern, N. (2006). What is the Economics of Climate Change?. https://www.humphreyfellowship.org/system/files/stern_summary___what_is_the_economics_of_climate_change.pdf
- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge
- Svennevig, B. (2018). Top 5 most efficient ecosystems for carbon storage. Where on Earth can we store carbon?. *University of Southern Denmark*. https://www.sdu.dk/en/om_sdu/fakulteterne/naturvidenskab/nyheder2018/2018_10_29_eelgrass
- Tirole, J. (2017). *La economía del bien común*. Editorial Taurus.
- Toochi, E. (2018). Carbon sequestration: how much can forestry sequester CO_2 ?. *Forest Res Eng Int J*, 2 (3), 148–150.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2016). Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis. Technical support document, EPA, Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf.
- Vergara, W., Finch, M., Langer, P., Studart, R & Keneally, S. (2021). Colombia Shows Leadership in the Race Against Climate Change. *World Resources Institute*. <https://www.wri.org/insights/colombia-shows-leadership-race-against-climate->

