

---

---

# ARCHIVOS DE ECONOMÍA

---

---

## Mitigación del cambio climático con un Sistema de Comercio de Emisiones en Colombia: primeros hallazgos económicos

Rita SOUSA  
Andrés Camilo ÁLVAREZ-ESPINOSA  
Nicolás ROJAS PARDO  
Sioux Fanny MELO LEON  
Germán ROMERO OTALORA  
Leidy Caterin RIVEROS SALCEDO  
Silvia Liliana CALDERON DIAZ  
Catarina VAZAO



**Documento 469**  
**Dirección de Estudios Económicos**  
**2 de enero de 2018**

---

La serie ARCHIVOS DE ECONOMÍA es un medio de divulgación de la Dirección de Estudios Económicos, no es un órgano oficial del Departamento Nacional de Planeación. Sus documentos son de carácter provisional, de responsabilidad exclusiva de sus autores y sus contenidos no comprometen a la institución.

Consultar otros **Archivos de economía** en:

<https://www.dnp.gov.co/estudios-y-publicaciones/estudios-economicos/Paginas/archivos-de-economia.aspx>

<http://www.dotec-colombia.org/index.php/series/118-departamento-nacional-de-planeacion/archivos-de-economia>

# Mitigación del cambio climático con un Sistema de Comercio de Emisiones en Colombia: primeros hallazgos económicos

Rita SOUSA <sup>α</sup>;  
Andrés Camilo ÁLVAREZ-ESPINOSA <sup>β</sup>;  
Nicolás ROJAS PARDO<sup>χ</sup>;  
Sioux Fanny MELO LEON<sup>β</sup>;  
Germán ROMERO OTALORA <sup>β</sup>;  
Leidy Caterin RIVEROS SALCEDO<sup>β</sup>;  
Silvia Liliana CALDERON DIAZ <sup>β, γ</sup>;  
Catarina VAZAO<sup>η</sup>

## Resumen

Este artículo analiza las implicaciones económicas de un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE) en Colombia para el cumplimiento de los acuerdos de reducción de emisiones. Para ello se diseñó un módulo de comercio de emisiones en el modelo de equilibrio general MEG4C. A partir de este análisis se logró identificar que un SCE puede tener dos efectos: i) los sectores regulados incorporan el costo marginal de las emisiones en la producción, lo que trae una reducción en la producción y ii) los sectores sustituyen los bienes intensivos en emisiones, buscando minimizar los costos asociados al valor de permiso de emisión, lo que conduce a una disminución de las emisiones por cambio en la intensidad. Finalmente, se observa que cuando el recaudo, logrado por la venta de los permisos, se usa para fomentar la demanda de capital (incentivar la inversión), los resultados son positivos ya que estos recursos contribuyen a la transformación económica, al desarrollo sostenible y a la generación de otros co-beneficios.

**Palabras clave:** sistema de comercio de emisiones, cambio climático, modelo de equilibrio general, mitigación.

**JEL:** C68, O44, Q54.

---

<sup>α</sup> Economics Department- School of Economics and Management, University of Minho, Campus de Gualtar , 4710 - 057 Braga, Portugal . e-mail: [ritasousa@eeg.uminho.pt](mailto:ritasousa@eeg.uminho.pt)

<sup>β</sup> Economistas de la Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible del Departamento Nacional de Planeación. E-mail: [acalvarez@dn.gov.co](mailto:acalvarez@dn.gov.co) e-mail: [gdromero@dn.gov.co](mailto:gdromero@dn.gov.co)

<sup>χ</sup> Investigador, GET2C. [nicorojaspardo@gmail.com](mailto:nicorojaspardo@gmail.com)

<sup>γ</sup> Subdirectora de Desarrollo Ambiental Sostenible del Departamento Nacional de Planeación. E-mail: [scalderon@dn.gov.co](mailto:scalderon@dn.gov.co)

<sup>η</sup> Directora GET2C e-mail: [catarina.vazao@get2c.pt](mailto:catarina.vazao@get2c.pt)

# 1 Introducción

En 2015, 197 países presentaron oficialmente en la vigésima primera Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas al Cambio Climático (CMNUCC), desarrollada en París, sus contribuciones al acuerdo climático firmado ese año para evitar que la temperatura global se incremente en más de 2°C, en relación con la temperatura preindustrial. Cada uno de los países definió de manera autónoma, en lo que se conoce como Contribución Nacionalmente Determinada (NDC por sus siglas en inglés), su aporte al esfuerzo del mundo por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (GARCÍA et al., 2015).

El compromiso de Colombia fue reducir en un 20% las emisiones de GEI para 2030, con respecto a un escenario inercial<sup>1</sup> o línea base (García et al., 2015). Para lograr este objetivo, el país ha venido enviando señales, tanto de política como de precios, para promover esta reducción. Dentro de las señales de política se encuentran: i) la aprobación del decreto 298 de 2016, que crea el Sistema Nacional de Cambio Climático -SISCLIMA, como instancia para la coordinación de las políticas de cambio climático y ii) la aprobación de la Política Nacional de Cambio Climático como estrategia para incluir la gestión del cambio climático en la toma de decisiones del sector público y privado, y así avanzar en una senda de desarrollo baja en carbono y resiliente al clima.

Como señal de precio, el país en su más reciente reforma tributaria (Ley 1819 de 2016) logró incorporar un impuesto al carbono, un instrumento económico que permite internalizar en el flujo contable de las empresas el costo de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en su actividad productiva. El impuesto cubre cerca del 24% de las emisiones del país y está enfocado en el sector transporte y los combustibles líquidos<sup>2</sup>. Si bien este instrumento económico les da certeza a los mercados sobre el precio de la externalidad generada (el gobierno es quien fija el precio), no da certeza sobre la reducción de emisiones, debido a que le permite al mercado determinar la cantidad de emisiones reducidas.

---

<sup>1</sup> Este escenario se construye proyectando las emisiones de GEI del año 2010 hasta el 2030, asumiendo que el país no implementará medidas de mitigación que reduzcan dichas emisiones.

<sup>2</sup> De acuerdo con el inventario de efecto invernadero (IDEAM, 2016) se emitieron 185,6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq en el año 2012. Estas emisiones se distribuyen de la siguiente manera: sector forestal y agropecuario con un 47%; seguido de las industrias manufactureras y de la construcción con un 15%; el sector transporte con 15%; las industrias de la energía con un 14%; las actividades de saneamiento 5%; residencial con 3%; y finalmente el comercio con 1%.

Lo anterior, ha llevado a que los hacedores de política de Colombia también tengan interés en la creación de un mercado de carbono o sistema de comercio de emisiones (SCE), pues con este instrumento el gobierno establece la cantidad de emisiones que se pueden generar. Al respecto, el artículo 6 del acuerdo de París establece la posibilidad de implementar acuerdos voluntarios nacionales o internacionales que les permite a los países cumplir con su NDC. Esto, en consecuencia, abre la posibilidad de lograr las reducciones de GEI por medio de mercados de carbono que tengan unas condiciones claras para evitar la doble contabilidad de las emisiones (GARCÍA et al., 2016).

En ese orden de ideas, el presente documento busca evaluar las implicaciones económicas del establecimiento de un sistema de comercio de emisiones en Colombia, como instrumento para lograr el cumplimiento del acuerdo de París. Para cumplir con este propósito, se desarrolló un módulo adicional dentro del Modelo de Equilibrio General Computable de Cambio Climático para Colombia (MEG4C)<sup>3</sup>, el cual incluye las ecuaciones necesarias para modelar el comportamiento de un SCE en el país. El desarrollo de esta modificación se basa en el trabajo realizado por TANG, SHI y BAO (2016) y WANG et al. (2015), quienes evaluaron la puesta en marcha de un SCE en un Modelo de Equilibrio General (MEG) para China.

El aporte que el documento hace a la literatura es evidente en dos aspectos. Por un lado, emplea un MEG para evaluar la implementación de un SCE para Colombia a nivel sectorial, en el que se consideran no sólo las emisiones de energía sino aquellas generadas por los procesos productivos de los sectores. Por el otro, realiza un desarrollo algebraico que refleja, justamente, la propuesta de creación del módulo SCE en el MEG4C.

Este documento, además de la introducción, contiene cuatro secciones. En la sección 2 se hace la revisión de literatura que muestra los SCE y la manera en que se evalúan económicamente. En la sección 3 se presenta la estructura conceptual del MEG4C, a partir de la cual se desarrolla la propuesta de modificación de las ecuaciones del MEG4C necesarias para la modelación del SCE. Tras construir un conjunto de escenarios hipotéticos sobre las características de diseño del SCE, en la sección 4, se presentan los resultados de la modelación, haciendo énfasis en el crecimiento del PIB, las emisiones de

---

<sup>3</sup> Este modelo fue desarrollado por la Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible (SDAS) del Departamento Nacional de Planeación (DNP).

GEI y los precios relativos sectoriales. Finalmente, la sección 5 presenta las conclusiones, recomendaciones y limitaciones del mismo.

## 2 Revisión de literatura

### 2.1 Sistema de Comercio de Emisiones (SCE)

Un sistema de comercio de emisiones, al igual que un impuesto al carbono, es un instrumento económico que tiene como objetivos provocar cambios en las tecnologías y en el comportamiento de los agentes (productores, consumidores e inversores), a fin de reducir las emisiones de GEI; generar co-beneficios ambientales, de salud, económicos y sociales; además de proporcionar ingresos que puedan utilizarse para reducir otros impuestos o apoyar el gasto público en la acción climática u otras áreas (Banco Mundial, 2016). La distinción entre ellos está en que mientras con un SCE, el gobierno establece la cantidad de emisiones y el mercado determina el precio; con un impuesto al carbono, el gobierno fija el precio y el mercado es quien determina la cantidad de emisiones reducidas (Banco Mundial, 2016).

El concepto de realizar un pago por las emisiones que generan los procesos productivos y que estos pagos se hicieran dentro de un mercado fue propuesto por Jhon DALES en el año de 1969. Fue el protocolo de Kyoto el que impulsó y llevó a la implementación de este tipo de mercados en el mundo. Los mercados que se realizaron bajo ese acuerdo internacional fallaron, en términos generales, por la rigidez de sistema<sup>4</sup> (NEWELL et al., 2013).

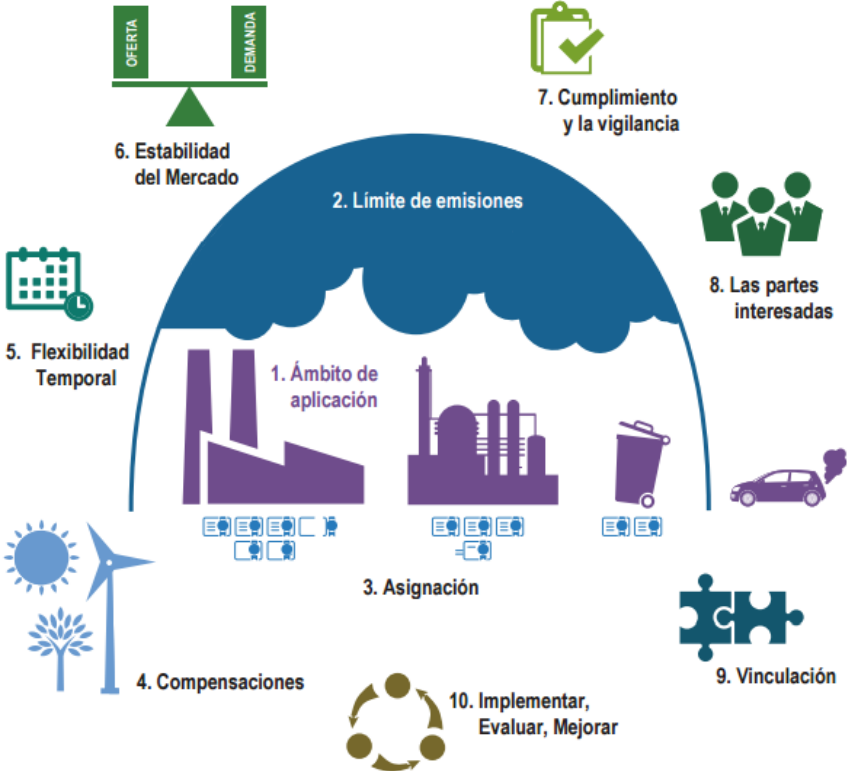
De acuerdo con el PMR & ICAP (2016), para la construcción de un SCE es necesario definir diez aspectos en el diseño. El primero es definir del ámbito de aplicación, en el que se precisan los sectores o actores regulados que demandarán los permisos de emisiones, así como los gases que harán parte del comercio. El segundo es establecer el límite de emisiones, es decir, el “número de derechos de emisión expedidos durante un plazo especificado, que limita la cantidad total de emisiones producidas por las entidades

---

<sup>4</sup> Newell et al. (2013) presenta detalles sobre los problemas de los mercados y mecanismos que se generaron en el tratado de Kyoto.

reguladas” (Banco Mundial, 2016, pág. 7). El tercer paso es asignar los derechos de emisión, ya sea de forma gratuita o mediante subasta. El cuarto es considerar si se “aceptarán compensaciones de fuentes y sectores no regulados por el límite dentro y/o fuera de la jurisdicción” (Banco Mundial, 2016, pág. 5) y, en caso de aprobarlo establecer su límite; el quinto es decidir la flexibilidad temporal del mercado, o en otras palabras, establecer las reglas para la acumulación o préstamos temporales de permisos de emisión (banking). El sexto paso es considerar la manera y los argumentos para intervenir el mercado; el séptimo es garantizar, a través de algún mecanismo, el cumplimiento y la vigilancia y el octavo es mapear, comunicar y fortalecer a las partes interesadas. Finalmente, los pasos noveno y décimo son, respectivamente, considerar la vinculación del SCE con otros mercados de emisiones e implementar, evaluar y mejorar el SCE (ver ilustración 1). En el anexo I se puede consultar detalle las necesidades para el diseño de comercio de emisiones.

**Ilustración 1: Pasos para el diseño de un SCE**



Fuente: PMR & ICAP (2016)

Los pasos uno y dos definen respectivamente, la demanda y la oferta del mercado del carbono. El precio de equilibrio del mercado es equivalente al de las subastas en el mercado (por información de información completa); ese valor es sensible a todas las reglas de juego que determinan un SCE, generando confianza entre los actores regulados. Pasar por alto alguna de esas consideraciones puede conducir a que los precios del mercado sean cero. Ese fue el caso, por ejemplo, del mercado de carbono europeo al inicio de su implementación, debido a que no estaba permitido guardar los bonos de emisión (Newell et al., 2013), o del mercado de Chicago, en donde el incremento desmedido de las compensaciones condujo a que los precios de los derechos de emisión alcanzaran valores de centavos (GRONEWOLD, 2011).

En la actualidad 35 países, 15 provincias o estados y 7 ciudades cuentan con un SCE. Dichos mercados se concentran principalmente en los sectores industriales y de generación eléctrica. Algunos incluyen también al sector transporte, vía compra de combustible (Estados Unidos y Canadá - California, Ontario y Quebec), y algunos casos excepcionales incluyen al sector de residuos (Nueva Zelanda y República de Corea) y al sector forestal (Nueva Zelanda). (ICAP, 2017). El énfasis en las industrias de generación eléctrica y del sector industrial, además de responder a buena parte de las emisiones en esas jurisdicciones, se explica en buena medida por los niveles de información de los sectores, y porque los sectores forestal y agropecuario tienen alta incertidumbre en sus emisiones.

## 2.2 Modelación económica de los SCE

Las estrategias de modelación para los SCE son muy variadas e incluyen técnicas tanto determinísticas como estocásticas. Los modelos determinísticos son herramientas que permiten entender de manera general e intuitiva los posibles efectos de un SCE en la economía. De igual forma, son versátiles en cuanto a la modelación y permiten comprender los efectos sectoriales y en el agregado de la economía.

Dentro de las herramientas de modelación determinística que estudian los mercados internacionales y nacionales se destacan los modelos de equilibrio general y parcial. BÖHRINGER, FERRIS y RUTHERFORD (1998), por ejemplo, emplean un MEG para establecer un mercado internacional de emisiones, en donde participan diferentes sectores y para los que identifican curvas de abatimiento. Lo anterior les permitió definir el

precio de cada uno de ellos, encontrando que la acción coordinada entre los sectores tiene efectos positivos en la reducción de emisiones.

Igualmente, KLEPPER y PETERSON (2005) modelaron con esta herramienta un mercado de bonos multiregional de la Unión Europea. Los resultados evidenciaron que hay distorsiones de mercado, debidas a otros mecanismos para reducción de impuestos diferentes al SCE.

Con la entrada en funcionamiento del SCE para China, algunos autores utilizan los MEG para estudiar la relación de los sectores y los efectos a un nivel agregado. HÜBLER, VOIGT, y LÖSCHEL (2014) evaluaron el efecto de la implementación de un mercado de emisiones de carbono, concluyendo que, en los sectores regulados por el SCE, las pérdidas serán significativas; e identificaron que en caso de vincularse al mercado europeo los resultados podrían ser positivos. TANG, SHI, y BAO (2016) estudian las acciones para el cumplimiento de la meta de Copenhague (reducción entre 2,5 y 3,7% anual en GEI entre 2016 y 2020) por medio de un SCE, y encuentran que, para lograrlo y no distorsionar la economía, los precios del mercado primario deberían oscilar entre 5 y 7 dólares. WANG, et al (2015) evaluaron el efecto de la incorporación de nuevo sectores en el SCE en la provincia de Guangdong y proponen evaluar políticas de choque, para evitar el despido de mano de obra no calificada ante la caída en la producción de los nuevos sectores regulados (papelero, construcción y maquinaria), por la imposición de un costo a las emisiones. LI y JIA (2016) evalúan la eficiencia de los permisos gratuitos a las empresas que fueron incluidos dentro del piloto que funciona desde 2013, y concluyen que éstos no compensan las pérdidas de los sectores.

BÖHRINGER y LANGE (2005), por medio de un modelo de equilibrio parcial, encuentran que la forma más eficiente de asignar los permisos de emisiones en mercados internacionales es teniendo en cuenta los efectos presentes de la emisión y no los futuros. Por su parte, ROSENDAHL (2008) identifica que tener un límite de emisiones fijos para todos los años, sin una tendencia a la reducción, puede generar una sobreoferta en los años y los precios de los permisos caer a cero.

THEMA et al. (2013), por su parte, con un modelo de programación lineal eléctrica enfocado a un mercado de carbono a nivel de país, muestra que las acciones para reducir



emisiones de un mercado de SCE podrían ser provechosas si éstas promueven la mejora tecnológica más que la entrada de compensaciones.

Los estudios que analizan los costos de un SCE desde la firma en su interacción con otras destacan que la estructura de mercado es importante en la imposición de un SCE. De igual manera, SONG, GOVINDAN, XU, DU, & QIAO (2017) con un modelo microeconómico muestran que los impactos directos son benéficos para la firma, siempre y cuando se preparen en la expansión en términos logísticos. Los autores también plantean que la capacidad de inversión de las firmas garantiza la supervivencia de éstas en estos mercados de carbono. Finalmente, ANOULIÈS (2015) en un modelo dinámico de economía cerrada, mostró que un sistema de comercio de emisiones no tiene ningún impacto sobre las firmas en un mercado oligopólico.

Las estrategias de modelación mencionadas anteriormente (determinísticas) tienen como principal limitación que se concentran en explicar el mercado primario de emisiones de carbono y, por ende, el mercado secundario no es modelado. Para entender los efectos en este último, las investigaciones se utilizan análisis estadísticos por medio de simulaciones de precios o análisis de series de datos existentes, esto permite comprender los comportamientos de arbitraje, fallas de información e incentivos. Esto exige una serie de datos que en escenarios hipotéticos se lograría solo con SCE.

### 3 Metodología y formulación del modelo

En esta sección presenta de manera general el MEG4C, se detalla el módulo de comercio de emisiones incorporado en dicho modelo, además de que se describen los escenarios que evalúan elementos del diseño del SCE.

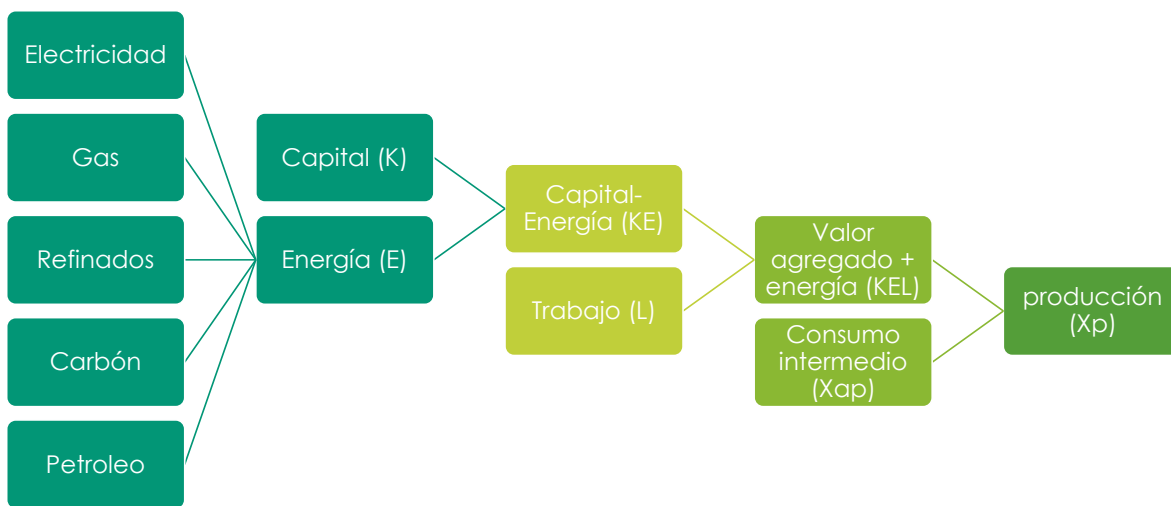
#### 3.1 Descripción y estructura productiva del MEG4C

El Modelo de Equilibrio General Computable de Cambio Climático para Colombia (MEG4C) es un sistema de ecuaciones que describe la economía en su conjunto. Se basa en ecuaciones derivadas directamente de la teoría microeconómica que representan el comportamiento racional de la oferta de productos y servicios de las empresas, la demanda de los consumidores para aumentar la utilidad, y las identidades macroeconómicas de forma general (ÁLVAREZ, et al 2017).

Todas las ecuaciones del modelo se resuelven simultáneamente para encontrar un equilibrio en el que las cantidades de oferta y la demanda sean iguales en todos los mercados, con un conjunto de precios<sup>5</sup>.

Un elemento particular del MEG4C, y lo que permite establecer un módulo de comercio de emisiones (SCE), es su estructura productiva. En las funciones de producción que la componen se relaciona explícitamente el uso del factor capital (K) con el bien agregado energía (E) (ver ilustración 2).

**Ilustración 2: Estructura productiva MEG4C**



Fuente: Elaboración propia

Asimismo, las funciones de producción relacionan insumos que pueden ser complementarios o sustitutos; en el caso del MEG4C se busca que exista complementariedad entre K y E en el corto plazo y un grado de sustitución en el largo plazo, para reducir gases de efecto invernadero. Lo anterior es posible ya que, al asumir un grado de sustitución entre capital y energía (o flexibilidad en la tecnología de producción), los costos de reducir las emisiones de GEI son menores, o si se quiere, las decisiones óptimas de producción tenderán a usar mejor los insumos energéticos.

El uso de los energéticos por parte de sectores económicos tiene una externalidad, generan emisiones. Sobre este hecho es factible desarrollar la propuesta de modificación de las ecuaciones del MEG4C necesarias para la modelación de un SCE.

<sup>5</sup> El detalle del modelo MEG4C puede consultarse en (DNP, 2017)

## 3.2 Módulo de SCE

### 3.2.1 Descripción del módulo

Teniendo en cuenta los pasos para constituir un SCE (ver sección 2.1), y aquellos considerados en la propuesta de SCE para Colombia<sup>6</sup>, a continuación, se presentan aquellos que se consideraron en la propuesta de modificación de las ecuaciones del MEG4C, necesarias para la modelación de un mercado de carbono:

- 1. Ámbito de aplicación:** Todos los sectores, todas las emisiones de gases de efecto invernadero.
- 2. Límite de emisiones:** Absoluto, corresponde con la senda temporal que implica logra el NDC de Colombia.
- 3. Asignación de los permisos de emisión:** Subasta, a partir de la demanda o requerimientos de permisos de emisiones. La asignación gratuita no es considerada en la propuesta y no es posible de implementar porque no se crearía un precio de mercado.
- 4. Compensaciones:** No se consideran compensaciones.
- 5. Flexibilidad temporal:** Banking. En caso, que los agentes no usen todos sus cupos, éstos pueden pasar al siguiente periodo de compromiso (año), y los cupos totales de ese periodo serán los cupos adquiridos en ese periodo de cumplimiento más el excedente del periodo anterior.
- 6. Intervención de mercado:** Se establece un corredor de precios exógeno (el precio mínimo corresponde al impuesto al carbono establecido en la reforma tributaria de 2016 y el precio máximo es 10 veces este valor).
- 7. Cumplimiento y vigilancia:** Como el MEG4C no tiene agentes heterogéneos con decisiones diferentes a minimizar los costos, en este caso no hay fugas de emisiones.
- 8. Partes interesadas:** No se considera.
- 9. Vinculación con otros esquemas de SCE:** No se considera.
- 10. Implementación, evaluación y mejora:** No se considera.

La incorporación de un SCE implica que los agentes regulados (sectores, en términos del MEG4C) demanden permisos de emisiones por dos conceptos: emisiones de producción

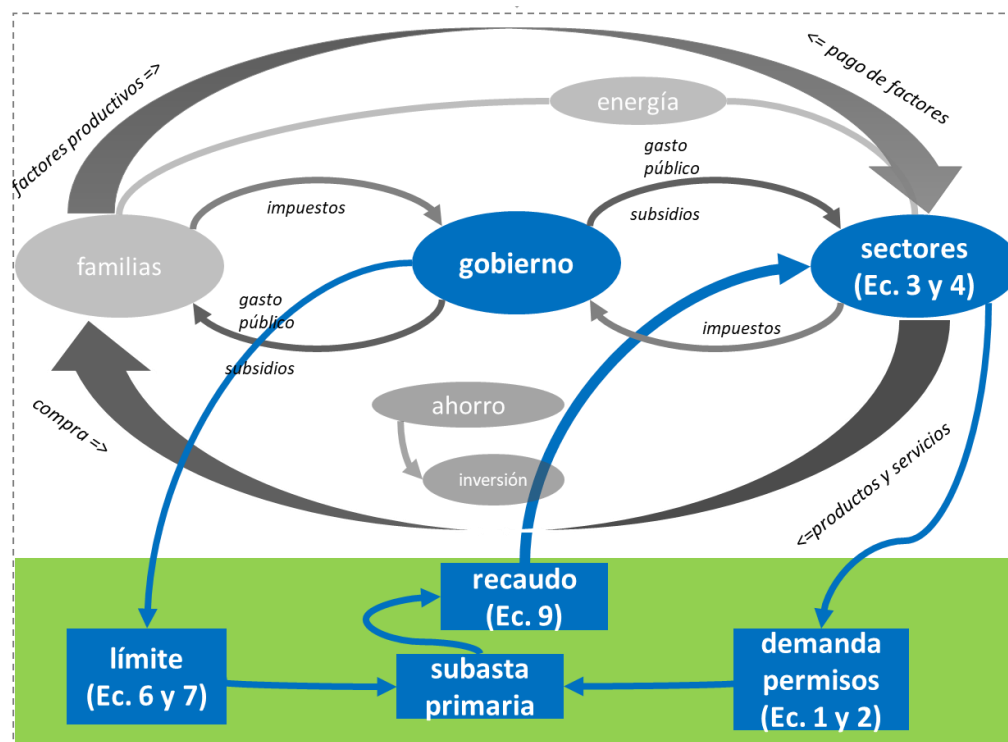
---

<sup>6</sup> Los detalles sobre la propuesta mencionada, consultar Carbón Trust; Econometria; Motu; Fedesarrollo y Universidad de los Andes (2017).

(ganadería, agricultura, residuos) y emisiones por consumo de energéticos fósiles (por ejemplo, uso de refinados de petróleo por parte del sector transporte, etc.).

En la ilustración 3 se muestra conceptualmente el módulo de SCE integrado en el sistema económico abierto, representado en el MEG4C. Dicha figura muestra las relaciones entre el gobierno, las familias y los sectores económicos. Los dos últimos agentes incorporan los costos de los permisos de emisión en su función de producción y, por tanto, podrían acceder al mercado demandando permisos cuya oferta está determinada por el límite de emisiones. El precio que equilibra el mercado está dado por la subasta del mercado primario y los recursos que se logran con este sistema se reincorporan en la economía como subsidios a los sectores económicos.

**Ilustración 3: Sistema económico representado en MEG4C con SCE**



Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2 Sistema de ecuaciones

Este acápite contiene las ecuaciones necesarias para modelar el comportamiento de un SCE en Colombia usando el MEG4C. Su construcción se basó en el trabajo realizado por TANG, SHI y BAO (2016) y Wang et al. (2015).

## Demanda de permisos de emisiones

La demanda por los permisos de emisión está en función de la producción y de la demanda de energía de los agentes regulados. Esto ocurre porque al estar la economía regulada, cada emisión que generen los procesos productivos y la demanda de energía de los sectores debe estar respaldada por los permisos de emisión.

La ecuación 1 denota la demanda por permisos de emisión del proceso productivo  $j$  en el periodo  $t$  ( $QCproc_{j,t}$ ), la cual depende de la unidad producida final ( $Xp_{j,t}$ ) y de su carbono intensidad ( $ac_j$ ). La ecuación 2 presenta los permisos de emisión demandados por el actor regulado  $j$  por consumo de energía ( $Qcprocener_{e,j,t}$ ). Dicha demanda depende de la cantidad del energético  $e$  consumida por  $j$  ( $xap_{e,j,t}$ ) y del coeficiente de emisión de ese energético ( $coeffco2e_{e,j}$ ).

$$QCproc_{j,t} = ac_j \cdot Xp_{j,t} \quad (1)$$

$$Qcprocener_{e,j,t} = coeffco2e_{e,j} \cdot xap_{e,j,t} \quad (2)$$

Como el costo de los permisos de emisión que enfrenta cada agente regulado por su proceso productivo ( $Cmgcproc_{j,t}$ ) se incorpora en la función de producción de los sectores, el costo de estos permisos se reflejará también en el precio del bien final ( $Pxv_j$ , ecuación 3). De igual forma, el costo de los permisos por emisión de los energéticos usados se incluyen en la función de demanda de energéticos ( $PEnerP_{j,t}$ , ecuación 4).

$$Pxv_j = \sum_{nf} (a_{nf,j} \cdot pa_{nf,t}) + akel_j \cdot pkel_{j,t} + ac_j \cdot Cmgcproc_{j,t} \quad (3)$$

Donde  $a_{nf,e}$  es el parámetro Leontief asociado a los consumos internos;  $pa_{nf,t}$  corresponde a precio Armington sectores no energéticos ( $nf$ );  $akel_j$  es el parámetro Leontief asociado al bien anidado Capital-Energía-Trabajo;  $pkel_{j,t}$  es el precio del bien anidado Capital-Energía-Trabajo;  $ac_j$  carbono intensidad por la unidad producida final; y  $Cmgcproc_{j,t}$  es el costo de los permisos de emisión que enfrenta cada agente regulado por su proceso productivo.

$$PEnerP_{j,t} = \frac{\sum_e [aep_{j,e,t} \cdot pa_{e,t} + Cmgcproc_{j,t} \cdot coeffco2e_{e,j}]}{\lambda aep_j} \quad (4)$$

Donde  $aep_{j,e}$  es la participación de cada bien energético en el paquete energía total;  $pa_{e,t}$  corresponde a precio Armington sectores energéticos  $e$ ;  $Cmgcproc_{j,t}$  es el costo de los permisos de emisión que enfrenta cada agente regulado;  $coeffco2e_{e,j}$  es el coeficiente de emisión del energético  $e$ ; y  $lambdae$  corresponde a la eficiencia del factor energía (AEEI por sus siglas en inglés).

La suma de ambas demandas de permisos de emisión de los sectores debe ser menor o igual a la demanda agregada de permisos de emisión del mercado ( $Qpermit_t$ , ecuación 5):

$$Qpermit_t \geq \sum_j \left[ Qcproc_{j,t} + \sum_e Qcprocener_{e,j,t} \right] \quad (5)$$

#### Oferta de permisos de emisiones

Como se mencionó la oferta de emisiones corresponde a un límite exógeno que determina el gobierno. Representa la restricción que el sistema deberá cumplir y sobre el cual se generará un precio de mercado. Dicha oferta se representa por la variable  $Ptpermit_t$ .

Adicionalmente, se incluye la posibilidad de que exista diferencia entre la oferta y la demanda de permisos de emisión – denominado  $excedente_{t-1}$  en el periodo de compromiso – (ecuación 6), y da la posibilidad de adquirir permisos de emisión hoy y usarlos en periodos futuros cuando se requieran (banking).

La condición de equilibrio estará determinada por la igualdad entre la demanda y la oferta, considerando que, si hay excedentes, éstos pueden hacer parte de la cantidad total de permisos del periodo corriente de cumplimiento (ver ecuación 7).

$$Ptpermit_t - \sum_j \left[ Qcproc_{j,t} + \sum_e Qcprocener_{e,j,t} \right] = excedente_t \quad (6)$$

$$Qpermit_t = \begin{cases} ptpermit_t + excedente_{t-1} \Leftrightarrow excedente_{t-1} > 0 \\ ptpermit_t \Leftrightarrow excedente_{t-1} \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

#### Precios de los permisos de emisión

Como condición de equilibrio se asume que el precio de los permisos de emisión es único, dado que es un mismo bien homogéneo que se transa y tiene movilidad perfecta. Esto implica la no existencia de arbitraje y que es a ese precio al que se enfrentan todos los sectores (ver ecuación 8). El precio final está determinado por el valor de todos los cupos y, en este caso, se asume movilidad perfecta de los cupos entre sectores.

Finalmente, el esquema de control de precios está dado por la franja que establece los valores mínimos y máximos. El precio mínimo fue fijado en cinco dólares, correspondiente al impuesto al carbono de Colombia y el precio máximo es 10 veces este valor, es decir, 50 dólares.

$$Cmgcproc_{j,t} = Cmgcproc_t \quad (8)$$

$$Cmgcproc_t \in [5,50]$$

### Uso del recaudo

Se decidió que el valor recaudado fomente la estructura productiva hacia una transición, invirtiendo en los actores regulados. En este caso, el recaudo - expresado en el valor de los cupos- hace parte de la demanda de capital de cada uno de los sectores ( $Kapdv_{j,t} \cdot Rent_{j,t}$ ) ponderado por la participación en la demanda total de capital de cada sector ( $Subk_{j,t}$ ).

$$\sum_j Kapdv_{j,t} \cdot Rent_{j,t} \cdot Subk_{j,t} \cdot Skrate = Cmgcproc \cdot \sum_j [Qcproc_{j,t} + \sum_e Qcprocener_{e,j,t}] \quad (9)$$

Donde  $Kapdv_{j,t}$  es la demanda de capital de cada uno de los sectores;  $Rent_{j,t}$  es la tasa de retorno del capital;  $Subk_{j,t}$  es la participación en la demanda total de capital de cada sector.

Sin embargo, uno de los escenarios evaluados considera que el valor del recaudo sea usado como ingreso del gobierno. Por lo tanto, el ingreso del gobierno se ajusta como lo muestra la ecuación 9a.

$$GovrentSCE = Govrent + Cmgcproc \cdot \sum_j [Qcproc_{j,t} + \sum_e Qcprocener_{e,j,t}] \quad (9a)$$

Donde  $GovrentSCE$  es el ingreso del gobierno adicionando el recaudo proveniente del SCE;  $Govrent$  corresponde a las rentas tradicionales.

### 3.2.3 Datos y calibración

La representación cuantitativa del MEG4C es la matriz de contabilidad social (MCS), construida a partir de la matriz de utilización, la matriz de oferta y las cuentas económicas integradas del Sistema de Cuentas Nacionales con año base 2011. Dicha matriz es la base con la cual se calibran varios parámetros de escala y de proporción del MEG4C.

El modelo es recursivo, desde el año 2011 hasta el año 2030, y está parametrizado por: el crecimiento de la fuerza laboral y poblacional; la acumulación de capital, el cual se acumula con la inversión corriente y el capital previo menos la depreciación que es del 4,9%; el progreso tecnológico, representado en la productividad de los factores y el progreso tecnológico de la energía, representado en cambios en la eficiencia energética general. El periodo 2011-2016 se utiliza para calibrar el modelo, de manera que éste replique los datos históricos; mientras que el periodo 2017-2030 se modela a partir de los supuestos macroeconómicos del marco fiscal de mediano plazo (MFMP) para Colombia.

Las emisiones relacionadas con emisiones por quema de combustibles fósiles se tomaron del Sistema de Cuentas Ambientales Económicas (SCAE) de energía y emisiones, elaborado por el DANE. Las emisiones producto de procesos industriales, cambio en el uso del suelo y pastizales, y residuos fueron tomadas y asignadas sectorialmente, gracias a la información de la Tercera Comunicación Nacional, elaborada por el IDEAM.

### 3.3 Escenarios de política

A fin de poder identificar diferentes esquemas de aplicación del SCE se simularon seis escenarios. Con ellos se busca determinar el efecto que tienen algunos elementos de diseño del SCE sobre la economía colombiana. Los escenarios de política se comparan frente a un escenario base, el cual surge tras replicar exitosamente la base de datos inicial (MCS) con la incorporación del módulo de emisiones.

El escenario comando y control (C&C) opera estableciendo un objetivo para las emisiones de GEI. Se impone una restricción obligatoria, igual al tope impuesto para alcanzar el compromiso de NDC –reducción del 20% en 2030, respecto a las emisiones de línea base para el mismo año.

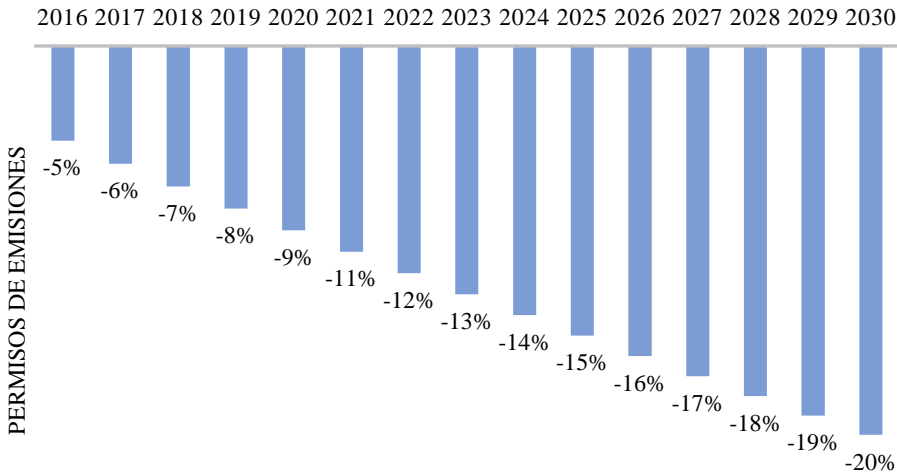
El escenario sistema de comercio de emisiones (SCE) tiene las siguientes características: todos los sectores económicos con emisiones están cubiertos, exceptuando los hogares;



hay un incremento en las emisiones de 3% anual, que corresponde al límite de emisiones necesario para cumplir el NDC, en caso que la economía colombiana crezca al 4%; el recaudo es dirigido a la inversión de capital; la asignación de permisos es subastada totalmente, no hay asignación gratuita; hay banking de permisos de dos años y el corredor de precio establecido está entre 5 y 50 USD/tCO<sub>2</sub>e.

Para la estimación de los resultados del SCE, se estableció un límite de emisiones equivalente a la trayectoria que se debería cumplir para lograr una reducción del 20% respecto a la línea base (BAU) en el 2030. La ilustración 4 muestra la reducción impuesta para el cumplimiento de la meta. Esta senda es una restricción exógena que no necesariamente corresponde a la que se va a realizar para el cumplimiento del acuerdo de París. Dicho límite corresponde a la reducción de emisiones que se impone para todos los demás escenarios considerados, asumiendo que la política de implementación del SCE inicia en el año 2016.

**Ilustración 4: Límite a las emisiones (reducción porcentual frente a línea base)**



Fuente: Elaboración propia

El escenario de menor alcance (Alcance) mantiene las mismas características del escenario SCE, excepto en los sectores cubiertos por el SCE. En este caso, sólo se incluyen las emisiones de las actividades relacionadas con las industrias manufactureras, de la construcción, de la energía, el sector transporte, actividades de saneamiento y comercio.

El escenario banking considera el posible efecto de elementos de flexibilidad temporal. Dicho escenario abre la posibilidad de usar el permiso de emisión en un periodo diferente al corriente de forma indefinida, y no sólo en dos años. Las demás características del escenario SCE se mantienen.

Finalmente, el escenario reciclado estudia la posibilidad de determinar qué efectos tiene el destino de los recursos. Para ello, se modificó la ecuación 9a, de tal manera que el recaudo haga parte del ingreso del gobierno en lugar de hacer parte de la demanda de capital. La idea principal es que los ingresos se utilicen para pagar el déficit fiscal del país.

La tabla 1 resume las principales características de los seis escenarios analizados que se analizan en la siguiente sección.

**Tabla 1: Detalles de los escenarios de política simulados**

#	Escenario	Descripción	Instrumento económico	Sectores	Reciclaje /recaudo	Asignación	Banking	Límites de Precios
1	Línea base –BAU	Corresponde al escenario de referencia	-	-	-	-	-	-
2	C&C	Modelo de comando y control	No	Todos	-	-	-	-
3	SCE	SCE	SCE	Todos	Capital/ Inversión	Subasta inicial	2° año	Entre 5 y 50 USD/tCO <sub>2e</sub>
4	Alcance	SCE típico con sólo sectores energéticos	SCE	Emisiones demanda de energía	Capital/ Inversión	Subasta inicial	2° año	Entre 5 y 50 USD/tCO <sub>2e</sub>
5	Banking	SCE con posibilidad de banking infinito	SCE	Todos	Capital/ Inversión	Subasta inicial	∞	Entre 5 y 50 USD/tCO <sub>2e</sub>
6	Reciclaje	SCE con uso de recursos en ingresos corrientes del gobierno.	SCE	Todos	Ingresos del gobierno	Subasta inicial	2° año	Entre 5 y 50 USD/tCO <sub>2e</sub>

Fuente: Elaboración propia

## 4 Resultados preliminares

El presente capítulo describe los resultados de cada escenario evaluado para cada una de las siguientes variables: crecimiento económico, reducción de emisiones observada, precios de los permisos de emisión, cambio en los precios del bien final y en la producción de los sectores.

### **Crecimiento del PIB**

Teniendo en cuenta que, según el MFMP, el crecimiento de la economía colombiana para el periodo 2015-2030 es, en promedio, de 3,9%, los resultados -luego de aplicar un SCE- sobre el crecimiento del PIB son heterogéneos para cada uno de los escenarios evaluados.

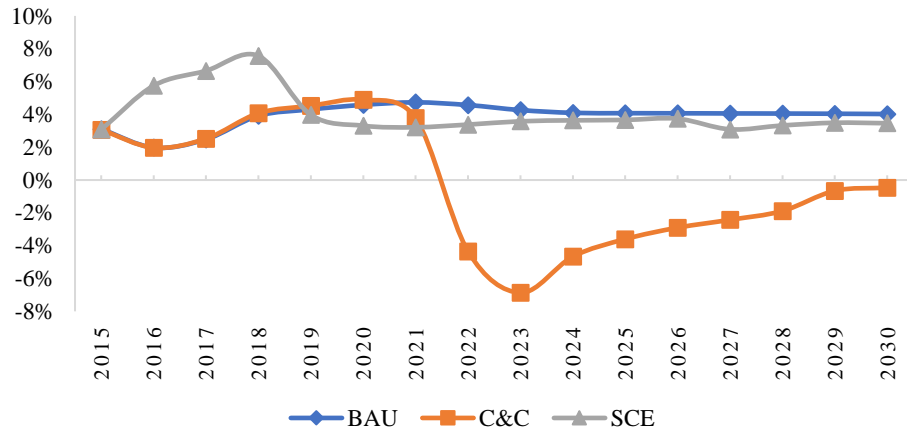
Al evaluar el escenario C&C el crecimiento promedio es de -0,2% en el mismo periodo de análisis. Esto se debe a una disminución de las emisiones asociadas al uso de energía y aquellas asociadas a al proceso productivo. Dicha caída en la producción directa genera una baja en la demanda de insumos, así como en el aumento del desempleo. Por tanto, incorporar una restricción de este estilo le imparte rigidez a la economía, haciendo que en los primeros años se acerque al escenario BAU, pero luego la reducción de la producción de los sectores energéticos se multiplica y, por tanto, los efectos se reflejen en una tasa de crecimiento negativa (ver ilustración 5).

Estos resultados se suavizan al incorporar un SCE para toda la economía. En este escenario, el crecimiento alcanza un promedio de 4,1% para el periodo 2015-2030 (ver ilustración 5). Esto se debe a que al incorporar la flexibilidad de los costos de emisiones los sectores regulados pueden suavizar su restricción de límite de emisiones. Por ello, el PIB aumenta inmediatamente (2016-2018) y disminuye cuando el costo adicional del permiso afecta los niveles de producción y la posibilidad de sustitución entre energéticos menos intensivos en emisiones (2019 y años siguientes).

En este escenario, los factores de producción (trabajo y capital) tienen comportamientos consistentes con los valores de crecimiento del PIB. A medida que la economía se desacelera, la demanda laboral y los salarios tienen un comportamiento constante después de 2025. Por construcción, los ingresos generados por la subasta primaria de los permisos de emisión son usados para fomentar la inversión de capital, por lo cual los sectores intensivos en él son favorecidos. La consecuencia del destino del recaudo es favorecer la sustitución entre energía y capital; por ello, se logra el objetivo ambiental,

representado en el cumplimiento del límite de emisiones, sin deteriorar el desempeño económico.

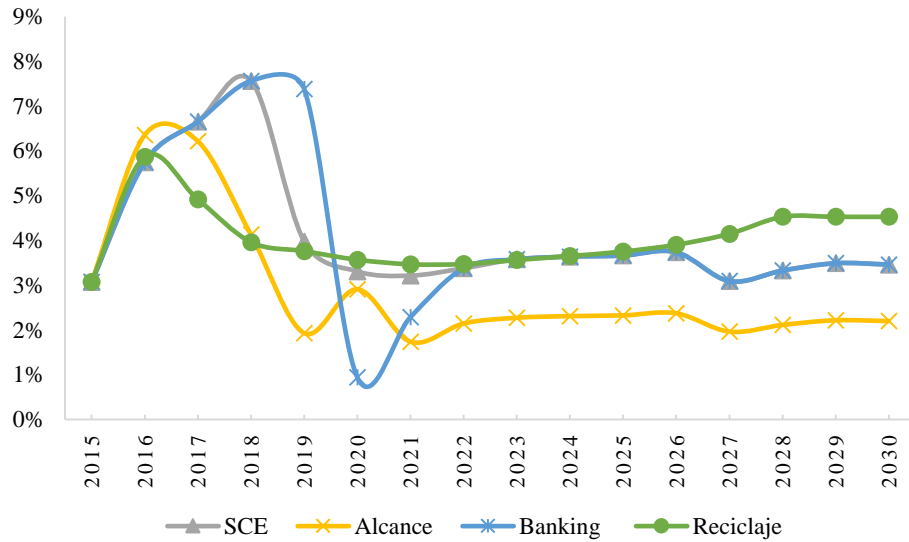
**Ilustración 5: Crecimiento del PIB en los escenarios BAU, C&C y SCE**



Fuente: Elaboración propia

Cuando se limita el alcance del SCE a los sectores tradicionalmente regulados por un comercio de emisiones (escenario alcance SCE) y se excluye el sector agropecuario, la economía crece en promedio 2,9% anual (ver ilustración 6). Como es evidente, el crecimiento del PIB es inferior a los valores del escenario BAU y también al escenario con todos los sectores cubiertos (escenario SCE). Esto se debe a la incorporación de un límite sobre un bien valorado en la economía para unos sectores. Al limitarse la demanda del insumo, los permisos de emisión se reducen en cantidad por el alcance de las emisiones, pero no dejan de ser un costo en la producción que no es compensado por el recaudo generado. En resumen, considerar un alcance amplio de sectores (escenario SCE) permite que el impacto de un SCE se diluya en toda la economía, suavizando el efecto sobre el PIB.

**Ilustración 6: Crecimiento del PIB en los escenarios SCE, SCE con alcance, banking y reciclaje.**



Fuente: Elaboración propia

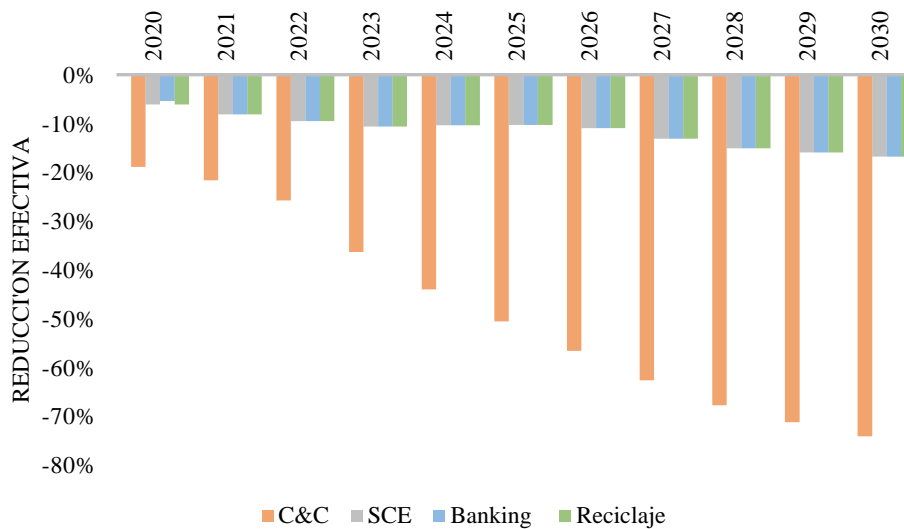
Cuando en el mercado no se limita el banking, es decir, no se establece un límite en la vigencia de los permisos de emisión, se encuentra que esta medida no tiene efectos sustanciales en el crecimiento de mediano plazo frente al escenario SCE. En el escenario banking, el crecimiento promedio anual es de 4,1%. Al mismo tiempo, el cambio en la demanda de capital provoca un cambio positivo cercano a 4% en 2019 y 1% en 2020. Esto es consecuencia del tipo del destino del recaudo de los permisos de emisión – inversión de capital. En los años restantes, no se obtiene ninguna tendencia inusual frente al escenario SCE (ver ilustración 6).

Finalmente, si el recaudo se envía al gobierno (escenario reciclaje), la tasa de crecimiento promedio para todo el periodo de tiempo es igual a 4,0%. Esto se explica a través de la contabilidad nacional. Como los ingresos del gobierno suman al PIB, dirigir el recaudo del SCE a esta cuenta tiene un efecto positivo sobre éste. Debido a la restricción de emisiones de los sectores, como en el escenario SCE, el crecimiento del PIB es menor que en el escenario BAU en la mayoría de los años, aunque se recuperará después de 2027. La robustez de los resultados después de 2028 es difícil de evaluar, por lo tanto, la interpretación de los valores observados frente al escenario base debería ser marginal.

## Emisiones de GEI

La ilustración 7 muestra el comportamiento de las emisiones en Gigagramos de dióxido de carbono equivalente para todos los escenarios simulados. El resultado del escenario C&C incorpora dos efectos: i) el cumplimiento del límite de emisiones, sin un mecanismo de flexibilidad, genera reducciones drásticas en la producción, y ii) la baja producción refuerza la reducción de las emisiones a niveles superiores a los esperados.

**Ilustración 7: Reducción de emisiones de GEI en los escenarios C&C, SCE, banking y reciclaje**  
(% respecto a línea base)



Fuente: Elaboración propia

Las emisiones de los escenarios SCE, banking y reciclaje se superponen. Este comportamiento es el esperado, considerando que la incorporación de un SCE controla la cantidad de emisiones, siguiendo la senda impuesta.

Se observa que la posibilidad de hacer banking por dos años da flexibilidad en los años iniciales, donde los permisos no utilizados en 2017 se suman al presupuesto de permisos de emisión en 2018, aunque inmediatamente se estabilizan al nivel límite después de 2019. Por su parte, es de esperar que el tipo de reciclaje no tenga consecuencias en las cantidades de emisiones.

## Precios de los permisos negociables

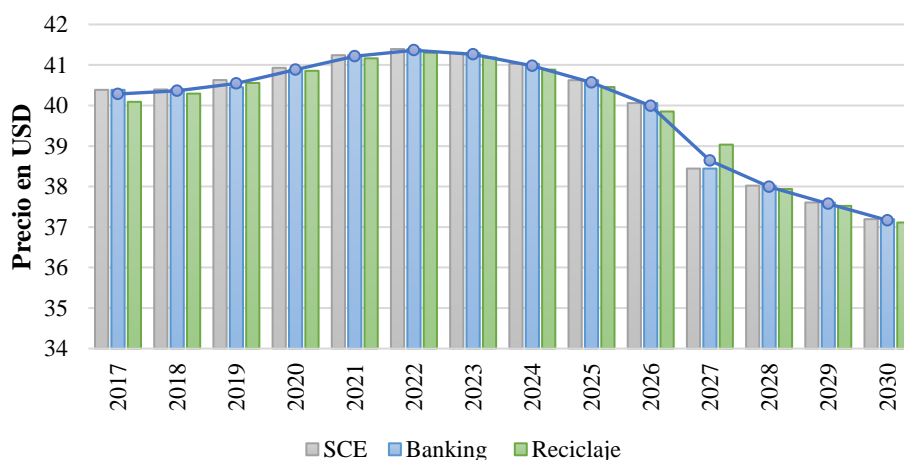
El precio de los permisos de emisión es una variable endógena en el modelo, que se determina principalmente por la oferta total y la demanda de los sectores por permisos de

emisión. Asumir información completa en el modelo simula la condición de asignación de los permisos mediante subasta. Los resultados encontrados muestran que, en general, el valor mínimo que alcanzan los permisos es 37 en el año 2030, mientras que valor máximo es USD 41,4 por tonelada de CO<sub>2</sub> en el año 2022 (ver ilustración 8). Lo anterior refleja que, efectivamente, los precios de los derechos de emisión se mantuvieron en el rango de intervención establecido para la modelación.

Estos valores por tonelada de emisión son considerablemente altos, si se comparan con los resultados obtenidos por TANG et al. (2016) para China. Tales autores reportan para ese país valores para los permisos entre 5 y 7 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las emisiones cubiertas en el ejercicio de China son 73 veces mayores a las de Colombia.

Los resultados son similares entre los escenarios de SCE, banking y reciclaje, tal como ocurrió con los resultados obtenidos en crecimiento del PIB (ver ilustración 8). Además, el precio de los derechos de emisión en los escenarios SCE, Banking y reciclaje aumenta al restringirse la oferta de permisos, y su comportamiento se debe únicamente a la tasa de crecimiento de los permisos negociables, que corresponde al 3% de crecimiento anual.

**Ilustración 8: Precio al carbono bajo los escenarios SCE, banking y reciclaje en Colombia**

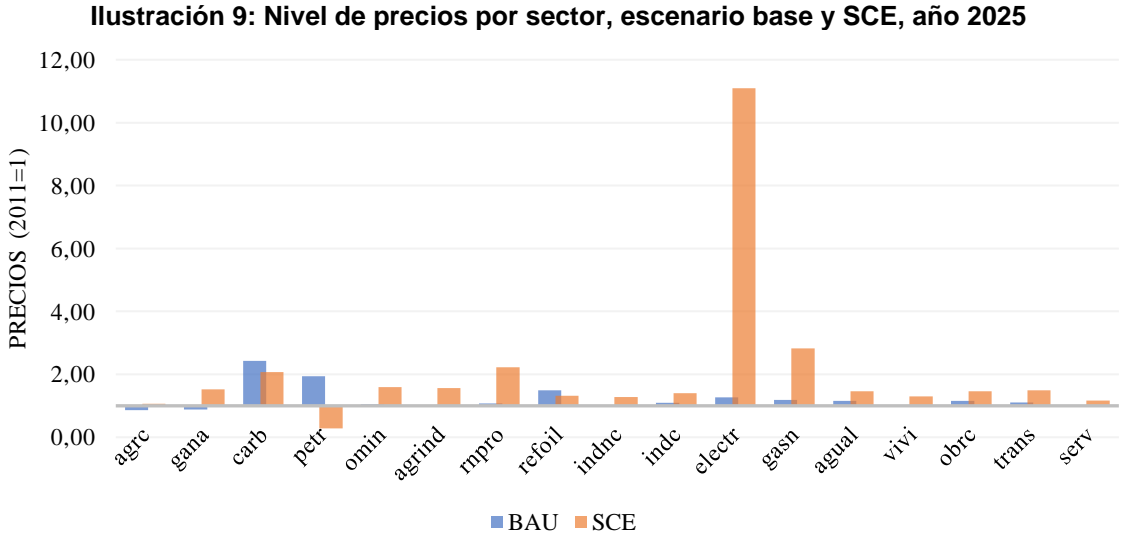


Fuente: Elaboración propia

### Precios de los bienes e impactos sectoriales

Como se esperaba, en el escenario SCE, el nivel general de precios aumenta a causa del costo adicional que tiene para los sectores productivos adquirir permisos de emisión. La ilustración 9 presenta una comparación de los niveles de precios sectoriales, en el escenario BAU y en el SCE que son homogéneos para todo el horizonte de tiempo, y por

tanto son similares al del año 2025. Cuatro sectores se destacan por el incremento o disminución en el precio de sus bienes: electricidad, que es el más aporta al nivel general de precios debido al costo del carbono (su factor de emisión es muy alto); y los sectores carbón, petróleo y productos refinados del petróleo. Éstos últimos disminuyen ligeramente los niveles de precio de sus productos finales, debido a que el recaudo se emplea para disminuir los costos del capital.

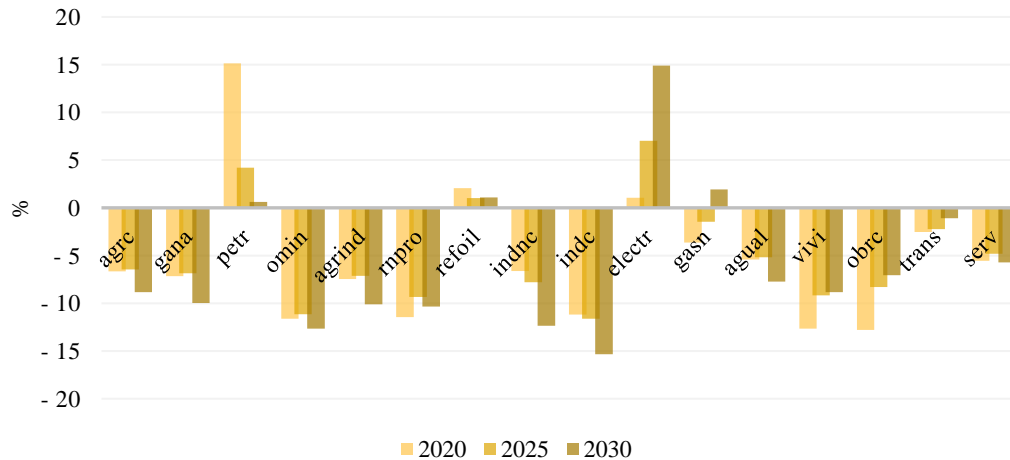


Fuente: Elaboración propia

Los resultados sobre la producción sectorial evidencian un impacto negativo en los sectores de ganadería, otros minerales, industria de productos o recursos naturales, e industria no calificada (ver ilustración 10). El sector electricidad tiene un buen desempeño al aumentar su participación en el PIB, en alrededor de 15pp en el escenario SCE frente al escenario BAU en el año 2030. Este resultado principal se debe a que un SCE promueve en el largo plazo la sustitución entre energéticos con menor intensidad de emisiones.



**Ilustración 10: Producción sectorial en el escenario SCCE**



Fuente: Elaboración propia

Los resultados del sector petróleo, carbón (omin) y ganadería deben considerarse con precaución. En este ejercicio preliminar, tales resultados son consecuencia de la atribución del recaudo hacia los sectores de alta intensidad de capital; por ello, se promueven sectores que son intensivos en capital y, simultáneamente, tienen altos niveles de emisión. Adicionalmente, considerando que buena parte de la producción minero - energética es para exportar (elasticidades altas en el comercio internacional), este sector podría responder fácilmente al aumento en el costo de producción en el mercado internacional, lo que podría generar riesgo de fuga de carbono o 'carbon leakage'. Esta situación podría variar en el caso que existan restricciones al mercado internacional. Los resultados son similares en los escenarios alcance y banking.

La disminución de la demanda laboral tras la incorporación de un SCE ocurre en todos los sectores, excepto en el sector transporte. Sin embargo, la sustitución entre trabajadores de un sector a otro no compensa el efecto global negativo, generando una reducción en el crecimiento del PIB comparado frente al escenario base. La demanda de capital aumenta en los sectores intensivos en capital, y aún más si son sectores de bajas emisiones, mientras disminuye en todos los demás.

Finalmente, en el escenario de reciclaje al gobierno, se evidenciaron comportamientos sectoriales esperados, es decir, petróleo y carbón reducen su producción; sin embargo, la producción sectorial de otros sectores se deteriora más frente al escenario SCE.

## 5 Conclusiones y recomendaciones

La política nacional de cambio climático considera la implementación de instrumentos económicos como herramientas para avanzar en una senda de desarrollo baja en carbono y resiliente al clima, siempre y cuando éstos tengan en cuenta la dinámica económica y social del país. Los resultados obtenidos en este documento evidencian que un sistema de comercio de emisiones permitiría lograr las metas de mitigación del NDC de forma costo-efectiva.

De igual forma, es fundamental que los hacedores de política entiendan los elementos básicos que conforman un SCE y sus implicaciones económicas, como ejercicio previo al establecimiento de un sistema de este estilo en Colombia. Contar con el MEG4C como metodología para evaluar un SCE, facilitó analizar diferentes escenarios, con condiciones distintas de estos elementos que contribuyeron a identificar las consecuencias económicas de cada uno de ellos.

Los resultados del ejercicio propuesto permiten concluir que la implementación del SCE (escenario SCE) con las características propuestas puede tener dos efectos en la economía colombiana. Por un lado, los actores regulados enfrentan un costo adicional que es incorporado en el precio del producto y, asumiendo demanda constante, reduce la cantidad producida (esto implica reducir el PIB). Por otro lado, los mismos actores regulados mejoran su forma de producción y sustituyen su estructura energética, a fin de minimizar la pérdida económica asociada al valor del permiso de emisión. Esto conlleva a la reducción de las emisiones y de la intensidad del carbono.

Los resultados en términos de producción del sector petróleo, carbón y ganadería deben considerarse con precaución. En esta estimación, su comportamiento es consecuencia de la destinación del recaudo hacia la inversión. Este comportamiento cambia conforme a la destinación de los ingresos del SCE.

A pesar de sus bondades, el MEG4C con un módulo de SCE no permite entender los efectos de aspectos que son clave en un mercado de emisiones, como son la existencia de costos de transacción y de sistemas de información para hacer las verificaciones de reducción. Asimismo, la imposibilidad de simular el mercado de tierras implica que el aumento en la producción/productividad del sector aumenta la frontera agrícola, y por esa razón, los resultados en este sector deben ser tomados con cautela.

En futuros ajustes del MEG4C con SCE se debe prestar atención a la asignación del recaudo a sectores intensivos en capital y no intensivos en emisiones. Además, se recomienda que en próximos trabajos se exploren otras opciones de diseño del SCE, como, por ejemplo:

- No considerar las emisiones propias del proceso productivo dentro del alcance del SCE, sino únicamente las energéticas.
- Incorporar la asignación gratuita en algunos sectores regulados que puedan tener efectos negativos en competitividad tras la posible implementación de un SCE.
- Reconsiderar el corredor de precios como mecanismo de contención de costos del sistema.
- Evaluar y diseñar el mercado secundario, aquel donde se encuentran sectores e intercambian la titularidad del permiso de emisión, sin que se redima ante la autoridad ambiental.
- Considerar las compensaciones. Éstas pueden reducir el costo del carbono, fomentar nuevas opciones de negocios y reducir los impactos negativos sobre la economía manteniendo los beneficios ambientales.

## 6 Agradecimientos

Este documento fue elaborado en el marco del Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático del DNP y contó con el apoyo del programa The Partnership Market Readiness (PMR). El equipo de trabajo agradece a la Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Dirección de Síntesis y Cuentas Nacionales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

## 7 Referencias

- Air Resources Board. (Septiembre de 2012). Cap-and-Trade Regulation Instructional Guidance. Recuperado el 28 de Noviembre de 2017, de CHAPTER 1: HOW DOES THE CAP-AND-TRADE PROGRAM WORK: <https://www.arb.ca.gov/cc/capandtrade/guidance/chapter1.pdf>
- ÁLVAREZ-ESPINOSA, A., ORDÓÑEZ, D., NIETO, A., WILLS, W., ROMERO, G., CALDERÓN, S., . . . DELGADO-CADENA, R. (2017). Evaluación económica de

los compromisos de Colombia en el marco de COP21. *Revista Desarrollo y Sociedad* (79), 15-54.

- ANOULIÈS, L. (2015). Heterogeneous firms and the environment: a cap-and-trade program. *Journal of Environmental Economics and Management*, 84, 84-101.
- Banco Mundial. (2016). Comercio de emisiones en la práctica: Manual sobre el diseño y la implementación de sistema de comercio de emisiones. Washington, D.C.
- BÖHRINGER, C., & LANGE, A. (2005). On the design of optimal grandfathering schemes for emission allowances. *European Economic Review*, 49, 2041-2055.
- BÖHRINGER, C., & LÖSCHEL, A. (2005). Climate Policy Beyond Kyoto: Quo Vadis? A Computable General Equilibrium Analysis Based on Expert Judgements. Centre for European Economic Research .Discussion Paper No. 03-09.
- BÖHRINGER, C., FERRIS, M., & RUTHERFORD, T. (1998). Alternative CO2 abatement strategies for the European Union. En S. Proost, & J. B. Braden, *Climate Change, Transport and Environmental Policy* (págs. 16-47). Edward Elgar.
- BÖHRINGER, C., LÖSCHEL, A., MOSLENER, U., & RUTHERFORD, T. (2009). EU climate policy up to 2020: An economic impact assessment. *Energy Economics*, 31(Supplement 2), S295-S305.
- BRAUN, M. (2009). The evolution of emissions trading in the European Union – The role of policy networks, knowledge and policy entrepreneurs. *Accounting, Organizations and Society* , 469-487.
- Carbon Trust; Econometria; Motu; Fedesarrollo; Universidad de los Andes. (2017). Análisis de los vacíos legales e institucionales actuales para la operación de un Sistema de Comercio de Emisiones de GEI a nivel nacional. Producto no. 2 Mapa de Ruta para el análisis y diseño de un posible SCE de GEI en Colombia.
- CORREDOR, D., & PARDO, O. (2007). Matrices de Contabilidad Social 2003, 2004 y 2005 para Colombia. *Archivos de Economía*.
- DNP. (12 de diciembre de 2017). Manual Modelo de Equilibrio General Computable Colombiano para Cambio Climático -MEG4C-. Obtenido de Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático:  
[https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/\\_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=/CDT/Ambiente/2015%20Manual%20MEG4C.pdf&action=default](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=/CDT/Ambiente/2015%20Manual%20MEG4C.pdf&action=default)

- European Union. (Junio de 2016). The EU Emissions Trading System (EU ETS). Recuperado el 28 de Noviembre de 2017, de European Commission Climate Action: [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/factsheet\\_ets\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/factsheet_ets_en.pdf)
- FRANCO, C. J., OLAYA, y., FERNÁNDEZ, O., VELÁSQUEZ, J. D., A., L. M., & DYNER, I. (2011). Modelo de Dinámica de Sistemas para evaluar una política baja en carbono para Colombia. 9° Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas. La Dinámica de Sistemas: Un Paradigma de Pensamiento. Bogotá D.C.: Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario.
- GARCÍA, C. G. (2016). El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático 1 ed. . Cali, Colombia. : WWF-Colombia. .
- GARCÍA, C., GÓMEZ , R., & Suárez, R. (2015). El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21. 2 ed. WWF-Colombia.
- GRONWOLD, N. (3 de Enero de 2011). Chicago Climate Exchange Closes Nation's First Cap-And-Trade System but Keeps Eye to the Future. the New York Times.
- GUTIERREZ, V., & Lopera, G. (2001). Valoración económica de la fijación de carbono en plantaciones tropicales de Pinus Patula. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia. Recuperado el 13 de Diciembre de 2017, de [https://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio\\_carbono/16\\_Gutierrez.PDF](https://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/16_Gutierrez.PDF)
- HARSTAD, B., & ESKELAND, G. (2010). Trading for the future: Signaling in permit markets. *Journal of Public Economics*, 94, 749-760.
- HÜBLER, M., VOIGT, S., & LÖSCHEL, A. (2014). Designing an emissions trading scheme for China—An up-to-date climate policy assessment. *Energy Policy*, 75, 57–72.
- ICAP. (2017). Emission Trading Worldwide: Status report 2017. Berlín: ICAP.
- Ideam, PNUD, MADS, DNP, Cancillería. (2016). Inventario nacional y departamental de gases efecto invernadero- Colombia. Bogotá: Tercera comunicación nacional del cambio climático.
- KLEPPER, G., & PETERSON, S. M. (2005). Emissions Trading, CDM, Ji, and More - the Climate Strategy of the EU. FEEM Working Paper No. 55.05.
- LI, W., & JIA, Z. (2016). The impact of emission trading scheme and the ratio of free quota: A dynamic recursive CGE model in China. *Applied Energy*, 174, 1–14.

- LUDEÑA, C., Miguel, C. d., & SCHUSCHNY, A. (Agosto de 2015). Cambio climático y mercados de carbono: repercusiones para los países en desarrollo. *Revista Cepal*(116), 61-85.
- MADS. (2017). Política nacional de cambio climático: documento para tomadores de decisiones. Bogotá.
- MARGOLIS, J. (14 de Junio de 2005). Chicago Climate Exchange paves the way for U.S. emissions trading. Recuperado el 14 de Diciembre de 2017, de Grist. BUSINESS & TECHNOLOGY: <http://grist.org/article/margolis-ccx/>
- MÉNDEZ RAIGOZA, M., & RESTREPO AMARILES, E. (Mayo de 2013). Los bonos de carbono y el impacto en la economía colombiana. Obtenido de Escuela de ingeniería de Antioquia: <HTTPS://REPOSITORY.EIA.EDU.CO/BITSTREAM/11190/233/1/ADMO0812.PDF>
- MOA, J.-L., AGNOLUCCI, P., JIANG, M.-R., & FAN, Y. (2014). The impact of Chinese carbon emission trading scheme (ETS) on low carbon energy (LCE) investment. *Energy Policy*, 89, 271-283.
- MONSTADT, J., & SCHEINER, S. (2014). Allocating green house gas emissions in the German federal system: Regional interests and federal climate governance. *Energy Policy*, 74, 383-394.
- NEWELL, R., PIZER, W., & RAIMI, D. (2013). Carbon Markets 15 Years after Kyoto: Lessons Learned, New Challenges. *Journal of Economic Perspectives*, 123–146.
- Partnership for Market Readiness (PMR) & International Carbon Action Partnership (ICAP). 2016. Comercio de Emisiones en la Práctica Manual sobre el Diseño y la Implementación de Sistemas de Comercio de Emisiones. Banco Mundial, Washington
- ROSENDAHL, K. (2008). Incentives and prices in an emissions trading scheme with updating. *Journal of Environmental Economics and Management*, 56, 69–82.
- SONG, S., GOVINDAN, K., XU, L., DU, P., & QIAO, X. (2017). Capacity and production planning with carbon emission constraints. *Transportation Research Part E*, 97, 132-150.
- SPRINGER, U. (2003). The market for tradable GHG permits under the Kyoto Protocol: a survey of model studies. *Energy Economics*, 25(3), 527-551. doi:[https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(02\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(02)00103-2)

- STERNER, T., & CORIA, J. (2012). Policy Instruments for Environmental and Natural Resource Management. Nueva York: RFF Press.
- TANG, L., SHI, J., & BAO, Q. (2016). Designing an emissions trading scheme for China with a dynamic computable general equilibrium model. Energy Policy (97), 207-520.
- THEMA, J., SUERKEMPER, F., GRAVE, K., & AMELUNG, A. (2013). The impact of electricity demand reduction policies on the EU-ETS: Modelling electricity and carbon prices and the effect on industrial competitiveness. Energy Policy, 60, 656-666.
- WANG, P., DAI, H.-C., REN, S.-y., ZHAO, D.-Q., & MASUI, T. (2015). Achieving Copenhagen target through carbon emission trading: Economic impacts assessment in Guangdong Province of China. Energy, 79, 212-227.

## Anexo 1: Elementos básicos que conforman un SCE

### 1. Ámbito de aplicación

Se refiere al ámbito de aplicación del comercio de emisiones. En este punto se definen *los sectores o actores regulados* quienes deberán demandar los permisos de emisiones. También se definen los gases que harán parte del comercio.

Un SCE que incluya el mayor rango de sectores y actores dependerá en buena medida de la factibilidad en la administración del sistema, de la eficiencia de los sectores regulados y del control sobre las fuentes de emisión.

El papel de los agentes regulados es obtener los permisos de emisiones, invertir en cambio tecnológico, participar en las subastas o en el mercado secundario de tal forma que acrediten las emisiones realizadas en un periodo de tiempo considerado.

### 2. Establecer el límite de emisiones

Corresponde al *«número de derechos de emisión expedidos durante un plazo especificado que limita la cantidad total de emisiones producidas por las entidades reguladas»* (Banco Mundial, 2016, pág. 7). El límite debe ser establecido por el gobierno o una autoridad de la región.

Para establecer el límite se debe tener una base de datos sólida, establecer el periodo de tiempo, tener presente objetivos de desarrollo y contrastar el tamaño del frente a los costos del sistema (entendiéndolos como costos de operación y mantenimiento).

### 3. Asignar los permisos de emisión

Este elemento hace referencia a los métodos de asignación inicial de los derechos de emisión. La distribución de los derechos tiene implicaciones económicas sustanciales en el SCE, incluso puede que no tenga efectos sobre la reducción. A continuación, se mencionan dos de ellos:



- Asignación gratuita: es favorable para las empresas/instalaciones que cuentan con poco dinero para adquirir los permisos de emisión. Esta opción minimiza el riesgo de fuga de emisiones, la hace políticamente viable y reduce el costo del cumplimiento.

Sin embargo, esta opción es costosa para el gobierno o la autoridad implementadora, se genera un incentivo para presionar al gobierno por parte de los actores regulados para obtener la mayor cantidad de derechos de forma inicial y mantener la asignación gratuita lo cual a su vez repercute en el nivel de emisión futuro.

- Subasta: una de las ventajas es que el recaudo ayuda a financiar los costos de la política y la asignación es simple administrativamente. Implica un costo el cual es pagado por los emisores de antemano (incrementa el costo de cumplimiento). Evita las expectativas sobre asignaciones futuras más generosas (o gratis). En esta forma de asignación el SCE inicia con ambición y poder de regulación.

#### 4. Compensaciones

Este elemento del SCE define a los *agentes no regulados*, la manera en la que pueden incorporar permisos de emisión respaldados en proyectos de mitigación, las *«compensaciones puede apoyar el aprendizaje y la colaboración entre fuentes no reguladas, facilitar los flujos de inversión hacia otros sectores donde se necesita apoyo financiero para estimular el desarrollo bajo en emisiones de carbono y, con frecuencia también, producir co-beneficios»* (Banco Mundial, 2016, pág. 8)

Una condición que diferencia las compensaciones de los permisos, es que los segundos se establecen frente a un límite mientras que las compensaciones frente a las emisiones corrientes. Por ello los mecanismos de monitoreo, verificación y reporte (MVR) deben ser homogéneos para permitir la expedición de compensaciones.

Una desventaja de las compensaciones (en particular, los forestales) es que es posible que estas no sean permanentes y el nivel de aseguramiento o confianza de almacenamiento es bajo, así que la reducción en emisiones no es efectiva y el sistema estará en entredicho.

## 5. Flexibilidad temporal

Hace referencia a las reglas para la *acumulación o prestamos temporales* de permisos de emisión. Hay un *trade off* entre flexibilidad temporal y certidumbre en las cantidades de las reducciones de GEI, por lo que aquello debe considerar un mecanismo de ajuste adicional. Los dos mecanismos usuales considerados son:

- *Banking/acumulación*: los agentes regulados pueden reducir más emisiones en el periodo actual de cumplimiento frente a los permisos de emisión otorgados, guardar los permisos y usarlos en periodo posteriores en los cuales sus emisiones sean mayores.
- *Borrowing/préstamo*: debe tener pocas emisiones en el periodo corriente y más en periodos posteriores de cumplimiento. En general, la acumulación de permisos «*promueve las reducciones tempranas además de ayudar a dispersar los costos en períodos de cumplimiento (...) puede haber razones para limitar la acumulación si existe una gran incertidumbre sobre el futuro del SCE*» (Banco Mundial, 2016, pág. 9)

## 6. Intervención de mercado

Hay tres factores que inciden en la formación de precios de mercado: los choques exógenos, la incertidumbre en la regulación y las imperfecciones en los mercados. La existencia o identificación de uno de los factores justificarían, en principio, la intervención en el mercado. Manejar la volatilidad en precios genera un ambiente apropiado para la inversión y contener los costos no desacredita el sistema. Una alternativa es establecer un sistema híbrido, que incorpora precios mínimos y máximos en los cuales se mueve el mercado.

## 7. Cumplimiento y vigilancia

El mecanismo de cumplimiento y vigilancia debe identificar a los *agentes regulados*, diseñar el enfoque de sanción y aplicarlo. Es deseable tener un MRV previo que levante información para el SCE, no se debe dejar de vigilar, de lo contrario entraría en riesgo (debe generar credibilidad desde el principio).

## 8. Vinculación con otros esquemas de SCE

La posible vinculación de SCE (entre jurisdicciones) permite que dos sistemas comercien permisos de emisión aumentando la eficiencia. Al existir diferencias de precios de permisos de emisión en equilibrio entre los sistemas vinculados se generan mayores ganancias por comercio, aumentará la “liquidez” del mercado, hay elementos adicionales para la estabilidad de precios.

Tras conocer los elementos de un SCE el paso siguiente es comprender el sistema económico que simula MEG4C. Entender ambos elementos conceptuales permite establecer la propuesta de modificación de las ecuaciones del MEG4C necesarias para la modelación de un SCE.