



ESTUDIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA

# Simulaciones del precio social del carbono en el sector del transporte público de América Latina y el Caribe

Marco Priego Adriano



NACIONES UNIDAS

CEPAL

Euroclima+



Financiado por  
la Unión Europea

# Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



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

 [www.cepal.org/es/publications](http://www.cepal.org/es/publications)

 [www.cepal.org/apps](http://www.cepal.org/apps)

# Simulaciones del precio social del carbono en el sector del transporte público de América Latina y el Caribe

Marco Priego Adriano



Financiado por  
la Unión Europea

Este documento fue preparado por Marco Priego Adriano, Consultor de la Unidad de Economía del Cambio Climático de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco de las actividades del programa EUROCLIMA+, con financiamiento de la Unión Europea.

Ni la Unión Europea ni ninguna persona que actúe en su nombre es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en esta publicación. Los puntos de vista expresados en este estudio son del autor y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Unión Europea.

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

Publicación de las Naciones Unidas  
LC/TS.2022/84  
Distribución: L  
Copyright © Naciones Unidas, 2022  
Todos los derechos reservados  
Impreso en Naciones Unidas, Santiago  
S.21-00629

Esta publicación debe citarse como: M. Priego Adriano, "Simulaciones del precio social del carbono en el sector del transporte público de América Latina y el Caribe", *Documentos de Proyectos* (LC/TS.2022/84), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022.

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

## Índice

<b>Resumen</b> .....	5
<b>Introducción</b> .....	9
<b>I. El presente estudio</b> .....	11
A. Marco conceptual.....	11
B. Objetivos del estudio.....	11
C. Alcance del estudio .....	12
<b>II. Sistemas de transporte público</b> .....	13
A. Sistemas de transporte .....	13
B. Caracterización del estudio .....	14
<b>III. Herramienta de evaluación socioeconómica</b> .....	17
A. Restricciones y limitaciones.....	17
B. Descripción de la herramienta .....	18
C. Escenarios de evaluación de PSC.....	19
1. Precio social de tonelada de carbono \$5 USD .....	22
2. Precio social de tonelada de carbono \$10 USD .....	24
3. Precio social de tonelada de carbono \$20 USD .....	26
4. Precio social de tonelada de carbono \$30 USD .....	28
5. Precio social de tonelada de carbono \$50 USD .....	30
D. Análisis de escenarios.....	32
<b>IV. Reto de escalamiento en tecnologías</b> .....	35
A. Barreras de implementación detectadas .....	35

<b>V.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b> .....	37
A.	Generales, industria de sistemas de transporte bajos en emisiones.....	37
B.	Específicas, precio social de carbono en el transporte público.....	38
<b>VI.</b>	<b>Recomendaciones de política pública</b> .....	39
A.	Institucionalización y empresarización.....	39
1.	Instituciones de transporte.....	39
2.	Empresas de transporte.....	39
3.	Conocimiento de tecnologías.....	39
B.	Evaluación socioeconómica.....	40
1.	Métodos de evaluación.....	40
C.	Financiamiento.....	40
1.	Gobiernos nacionales/federales.....	40
2.	Atracción de nuevos actores.....	40
3.	Bonos verdes.....	40
	<b>Bibliografía</b> .....	41

### Cuadros

Cuadro 1	Flota de autobuses en las principales 25 zonas metropolitanas de Latinoamérica.....	14
Cuadro 2	Numeralia de BRTs en operación en Latinoamérica.....	15
Cuadro 3	VPN y CAE de PSC a 5 dólares.....	22
Cuadro 4	Peso porcentual de cada elemento en el CAE por tecnología, PSC 5 USD.....	23
Cuadro 5	VPN y CAE de PSC a 10 USD.....	24
Cuadro 6	Peso porcentual de cada elemento en el CAE por tecnología, PSC 10 USD.....	25
Cuadro 7	VPN y CAE de PSC a 20 USD.....	26
Cuadro 8	Peso porcentual de cada elemento en el CAE por tecnología, PSC 20 USD.....	27
Cuadro 9	VPN y CAE de PSC a 30 USD.....	28
Cuadro 10	Peso porcentual de cada elemento en el CAE por tecnología, PSC 30 USD.....	29
Cuadro 11	VPN y CAE de PSC a 50 USD.....	30
Cuadro 12	Peso porcentual de cada elemento en el CAE por tecnología, PSC 50 USD.....	31

### Gráficos

Gráfico 1	Emisiones CO <sub>2</sub> , toneladas anuales.....	20
Gráfico 2	Contaminantes criterio, anuales. Otros contaminantes.....	20
Gráfico 3	Reducción porcentual de contaminantes respecto a la tecnología base.....	21
Gráfico 4	CAE PSC a 5USD.....	23
Gráfico 5	CAE en porcentaje por rubro, para cada tecnología PSC 5USD.....	24
Gráfico 6	CAE PSC a 10 USD.....	25
Gráfico 7	CAE en porcentaje por rubro para cada tecnología PSC 10 USD.....	26
Gráfico 8	CAE PSC a 20USD.....	27
Gráfico 9	CAE en porcentaje por rubro, para cada tecnología PSC 20USD.....	28
Gráfico 10	CAE PSC a 30 USD.....	29
Gráfico 11	CAE en porcentaje por rubro, para cada tecnología PSC 30USD.....	30
Gráfico 12	CAE PSC a 50USD.....	31
Gráfico 13	CAE en porcentaje por rubro, PSC 50USD.....	32

## Resumen

El sector transporte es una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente por los vehículos que se mueven a nivel de tierra: vehículos ligeros, camiones de carga, transporte público. Este último se encuentra en situación de rezago para lograr la incorporación de tecnologías que permitan bajas emisiones o incluso lleguen a cero emisiones locales como las eléctricas.

En Latinoamérica el transporte público se da principalmente en sistemas de autobuses. En los años recientes se han logrado nuevos proyectos de sistemas de transporte en autobuses que logran mejorar las emisiones; sin embargo, la transformación del transporte público aún tiene un largo camino que recorrer. Tan solo en las principales 25 ciudades de Latinoamérica hay más de 200 mil unidades que requieren renovarse a nuevas tecnologías bajas en emisiones, y puede estimarse que en la región existen más de 500 unidades de autobuses que por igual deben renovarse para reducir las emisiones de GEI y emisiones locales.

El transporte público en autobuses representa el principal medio de movilidad en las ciudades latinoamericanas, en algunas mayores al 50% del reparto modal. Por lo tanto, continuar con ciudades que mayoritariamente se mueven en transporte público y transporte no motorizado debe ser una prioridad para las ciudades latinoamericanas, a fin de lograr la sustentabilidad ambiental.

El presente estudio se enfoca en los proyectos de transporte público como principal medio de movilidad en Latinoamérica y evalúa la factibilidad de implementar sistemas de transporte público bajo en emisiones o con tendencia a cero emisiones. Esta evaluación se estima mediante el costo comparativo de implementar flotas de autobuses de diferentes tecnologías, para lo cual se desarrolla una herramienta de cálculo.

## Herramienta de evaluación de precios del carbono

La herramienta ofrece una evaluación socioeconómica<sup>1</sup> y financiera que compara los costos totales de proyectos de transporte público de autobuses bajos en carbono. Considera la información base de 7 tipos de autobuses de 12 metros de tecnologías diésel (EURO IV, V y VI), GNC, híbrida (EURO VI), Eléctrica de baterías, Eléctrica de carga de oportunidad (OppCharge<sup>2</sup>).

Se realizaron escenarios con diversos precios por toneladas de carbono para evaluar los cambios en los costos anuales equivalentes de las diferentes alternativas de flotas de autobuses. Los escenarios evaluados son \$5, \$10, \$20, \$30 y \$50 dólares por tonelada de carbono.

Sobre las tecnologías evaluadas puede resaltarse que los costos de adquisición de las unidades pueden llegar a representar desde un 16% hasta un 50% para autobuses diésel euro IV a eléctricos de baterías respectivamente. Por el contrario, el costo del combustible puede ir desde un 37% hasta un 5% para las mismas tecnologías. Los costos cuantificables de emisiones contaminantes por CO<sub>2</sub><sup>3</sup>, representan apenas un 4% para el caso donde la tonelada de carbono se cuantifica en 50USD, en la tecnología de mayor emisión.

Los contaminantes criterio pueden representar un fuerte incentivo para decidir sobre las tecnologías a adaptar, debido a que cuentan con fuertes restricciones de circulación, así como también tarificación y/o penalizaciones por circulación en zonas específicas. Este incentivo, combinado con los contaminantes GEI, puede realmente ser un decisor en el mercado de los sistemas de transporte de bajas emisiones, al igual que cuenta con mayor aceptación de la ciudadanía y tomadores de decisión al ver los efectos localmente.

Es común considerar que las tecnologías eléctricas no tienen emisiones GEI, lo cual en general es un error. Para estos casos es necesario considerar los factores de emisión de consumo de la matriz energética de la ciudad o país, esto llevará a una comparación más justa entre las diferentes tecnologías evaluadas.

## Oportunidades de adopción de tecnologías bajas en carbono

La adopción de flotas más limpias o cero emisiones depende en gran medida del volumen de unidades adquiridas. Es posible generar economías a escala que permitan la reducción de costos fijos, así como la reducción de costos de activos que aún tienen margen importante en las unidades, tal es el caso de las baterías. Entre más ciudades cuenten con flotas bajas en carbono, la industria tendrá mayores incentivos para su desarrollo, competencia y reducción de precios.

Latinoamérica cuenta con un potencial muy alto para la adquisición de unidades de autobuses. Tradicionalmente se ha movido en este medio de transporte y ha establecido la industria en la región. Con más de medio millón de unidades en la región, existe un mercado atractivo para el establecimiento de empresas armadoras y productoras de unidades, que no solo se comercialicen en la región, sino también tengan atractivo para exportar a otros mercados como el norteamericano.

La tarificación del precio del carbono es un incentivo que promueve el cambio tecnológico; sin embargo, requiere del acompañamiento de otros incentivos económicos y regulatorios, tal es el caso de regulaciones de emisiones locales que mejoren la calidad del aire, restricciones de circulación en zonas de baja emisión, o incentivos económicos a la compra de vehículos eléctricos o híbridos.

La reducción de carbono tiene efectividad cuando la generación de la energía es limpia y de preferencia renovable. Algunas economías permiten la producción y comercialización de energías entre privados, esto genera una gran oportunidad para incentivar la producción y consumo de energías

---

<sup>1</sup> Dado que incluye el costo ambiental a través del precio social del carbono.

<sup>2</sup> E.g.: autobús volvo de carga de oportunidad, <https://www.volvobuses.mx/es-mx/news/2017/may/volvo-buses-en-uitp.html>.

<sup>3</sup> No considera CO<sub>2</sub> equivalentes.

renovables en sistemas de transporte público, pudiendo establecer incentivos para el consumo mínimo de este tipo de fuentes.

La implementación de flotas bajas en carbono tiene una de sus principales barreras en la capacidad instalada en la planeación y toma de decisiones en las ciudades. Por lo cual es necesario invertir en la generación de capacidad humana, así como la formalización de instituciones que puedan planear los sistemas de transporte más allá de la perspectiva de operación, incluyendo por igual las políticas públicas necesarias, como el caso de las ambientales.

Regularmente los gobiernos locales son los responsables de los sistemas de movilidad, mientras que los nacionales de la política ambiental en materia de emisiones de gases de efecto invernadero. Esto genera una falla debido a que los incentivos y planes por lo regular no están alineados. El gobierno nacional debe buscar la generación de incentivos para que los gobiernos locales promuevan la adopción de tecnologías bajas en carbono. Regularmente los gobiernos nacionales establecen planes en la materia, incentivan y regulan la industria y ofrecen incentivos económicos directos a las ciudades que promuevan el cambio tecnológico.

### **Recomendaciones de política pública**

Cada país, incluso la región debe impulsar diversas políticas públicas para lograr la transformación del transporte público y que deriven en la implementación de tecnologías de bajas emisiones o incluso eléctricas tales como las que se describen a continuación.

#### **Institucionales**

- Establecer y generar capacidad en instituciones de transporte público.
- Establecer y generar capacidad para la formación de empresas de transporte público.
- Establecer un programa de información y capacitación en nuevas tecnologías.

#### **Metodología de evaluación**

- Incorporar en los métodos de evaluación socioeconómica las externalidades derivadas de gases de efecto invernadero, considerando las equivalencias de CO<sub>2</sub> de todos los GEI producidos.
- Establecer un programa de financiamiento de sistemas de transporte público bajo en emisiones.
- Ajustar los modelos de concesión y/o licitación para incorporar otros actores.

#### **Bonos verdes**

- Instrumentación de bonos verdes para proyectos de movilidad sustentable.



## Introducción

La comunidad internacional a través del Acuerdo de París se comprometió a trabajar por mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C y en este contexto, los países presentaron a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático sus metas de reducción de emisiones de GEI mediante sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDCs, por su sigla en inglés). Los países de América Latina y el Caribe se han unido a este compromiso y, por lo tanto, al igual que los países del resto del mundo requieren avanzar hacia un cambio estructural con patrones de producción y de consumo que sean más sostenibles y compatibles con la meta climática.

Muchos países para avanzar hacia este objetivo han realizado cambios regulatorios, a la política fiscal y a los incentivos económicos; sin embargo, el actual sistema de valoración de las emisiones no necesariamente toma en cuenta todas las variables relevantes y por lo tanto puede estar sesgado. En este escenario, resulta fundamental poder contar con un estudio en el que se presenten los resultados de simulaciones con distintos precios del carbono para el sector transporte en América Latina y el Caribe que pueda servir de insumo para la toma informada de decisiones.



## I. El presente estudio

### A. Marco conceptual

El sector transporte es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente por los vehículos que se mueven a nivel de tierra: vehículos ligeros, camiones de carga, transporte público.

El sector de transporte público presenta los mayores rezagos en la adopción de tecnologías bajas en carbono que contribuyan a la disminución de gases de efecto invernadero. Este sector carece de incentivos regulatorios o económicos suficientes para impulsar la adopción de tecnologías de nueva generación.

En la actualidad la mayoría del transporte público en Latinoamérica se realiza en autobuses impulsados por diésel, gas natural y en algunos casos gasolinas y eco combustibles. Esto deriva en una situación subóptima con externalidades negativas de emisiones de gases de efecto invernadero, así como emisiones de contaminantes criterio que empeoran la calidad del aire en las ciudades.

En la actualidad varios países y ciudades han buscado generar incentivos para la adopción de tecnologías de vanguardia que permitan la bajas o cero emisiones en el sector del transporte público.

### B. Objetivos del estudio

Realizar simulaciones con distintos precios del carbono para el sector transporte en América Latina y el Caribe y determinar cuál sería su impacto sobre el pipeline de la cartera de proyectos de inversión en este sector. Con este estudio también se pretende incentivar la generación de propuestas de políticas públicas frente al cambio climático que permitan contribuir al cumplimiento de las metas planteadas en sus NDCs.

## C. Alcance del estudio

El presente estudio realizará simulaciones con distintos precios del carbono para el sector transporte en América Latina y el Caribe y determinará cuál sería su impacto sobre la composición de la cartera de proyectos de inversión del sector, con el propósito de identificar el impacto de determinación de un precio social al carbono en la reducción de emisiones del sector, en el marco de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas para la región, y posibles recomendaciones de política pública para acelerar la migración hacia esquemas de movilidad más sustentables.

Para cumplir el objetivo planteado y atender el propósito del estudio se proponen tareas específicas, así también, se describe cómo se desarrollará cada una y cómo se vinculará con el propósito general del estudio para concluir con recomendaciones puntuales y estratégicas que, tomando en cuenta el estado actual del sector en la región, logren viabilizar la migración tecnológica del sector del transporte y contribuir de manera eficiente con las Metas Nacionalmente Determinadas. De manera particular con este estudio se busca:

- Analizar, a través de la comparación de escenarios de precio social del carbono, la reducción potencial de emisiones en el sector transporte público, considerando distintos tipos de tecnología, para la reducción de las emisiones;
- Documentar y analizar distintas opciones de precio social del carbono para ser aplicado en los proyectos de inversión en el sector transporte;
- Presentar recomendaciones de política pública respecto al papel que el precio social del carbono puede tener en el cumplimiento de las metas planteadas en las NDCs, principalmente el aporte del sector transporte.

## II. Sistemas de transporte público

### A. Sistemas de transporte

En la actualidad existen una gran variedad de sistemas de transporte público que pueden cumplir con las funciones deseadas de movilidad sustentable en las ciudades. En las discusiones de elección de tecnologías y modos de transporte es común sobre simplificar la solución a elegir, tal es el caso de las constantes discusiones de sistemas férreos contra sistemas de autobuses de alta capacidad.

Al elegir un sistema de transporte deben considerarse una serie de preguntas, sin ser exhaustivos ni listadas en orden:

- Demanda actual y proyectada
- Zona urbana/suburbana
- Requerimiento de paradas/estaciones cada determinada distancia
- Condiciones de movilidad deseadas: velocidad, tiempo de viaje, transbordos, personas principalmente sentadas, etc.
- Estándares de diseño deseados: accesibilidad, seguridad vial, tecnología de pago, información al usuario, control y operación, etc.
- Políticas públicas a cumplir: ambientales, de salud, de inclusión social, género, desarrollo económico, etc.
- Limitaciones: disponibilidad de derecho de vía, combustible disponible, terrenos para talleres y patios de encierro, presupuesto, etc.

Cada elemento mencionado corresponde a las necesidades de los clientes, así como de la ciudad, pero sobretodo de las limitaciones y parámetros de diseño que pueden tenerse en determinada ciudad, ya sean presupuestales, geográficas o tecnológicas.

Es natural que algunas soluciones puedan prestar los mismos servicios y respuestas de transporte público para un rango de necesidades; sin embargo, al considerar las limitaciones, en particular económicas y financieras, las opciones se acotan.

Por lo anterior, en condiciones de análisis socioeconómico sólo se comparan opciones que solucionan la necesidad de movilidad y que son congruentes ante las exigencias (e.g. no se compara un sistema de tren contra un sistema de bicis). Así también, es recomendable comparar soluciones en rangos adecuados de sus características y no en sus límites de prestación de servicios (capacidad esencialmente), aún cuando estos puedan cumplir lo requerido.

## B. Caracterización del estudio

La mayor parte de los sistemas de transporte público en Latinoamérica se realizan en autobuses. Tan solo en las principales 25 zonas metropolitanas de la región se calcula que más de 200,000 unidades prestan servicio (conforme a los datos del observatorio de movilidad urbana de la CAF), por lo cual puede estimarse una flota superior al medio millón de unidades de transporte público en la región, siendo entonces el modo de transporte de mayor representatividad.

**Cuadro 1**  
**Flota de autobuses en las principales 25 zonas metropolitanas de Latinoamérica**

Ciudad	Omnibus - Flota
	(nº) Transporte colectivo
Ciudad de México (2007)	54 957
São Paulo (2007)	20 750
Río de Janeiro (2007)	16 098
Buenos Aires (2007)	16 081
Bogotá (2007)	15 604
Lima (2007)	12 327
Caracas (2007)	11 761
Belo Horizonte (2007)	6 814
Santiago (2007)	6 475
Porto Alegre (2007)	5 413
Guadalajara (2007)	4 607
Salvador (2007)	3 669
Sierra Catarinense (2011)	3 564
Quito (2009)	3 314
Recife (2007)	3 229
Panamá (2010)	3 062
Curitiba (2007)	2 800
Brasilia (2007)	2 742
Manaus (2010)	2 536
Montevideo (2009)	1 987
León (2007)	1 788
San José (2007)	1 197
Florianópolis (2010)	993
Pereira (2009)	824
Rosario (2008)	714

Fuente: OMU CAF.

Con excepción de las ciudades que han establecido transformaciones relevantes en los sistemas de transporte público, como es el caso de las ciudades brasileñas, chilenas y algunas en Colombia, la mayor parte de la región aún se encuentra en necesidad de formalización de los sistemas de transporte, además que, en su totalidad, la región tiene el reto de buscar sistemas de menores emisiones contaminantes o incluso migrar a sistemas de vanguardia con cero emisiones.

Por lo anterior, el presente estudio se focaliza principalmente en las opciones de transporte público basados en autobuses, en donde la oportunidad de cambio es mayúscula y actualmente se encuentran constantemente en evaluación de proyectos de inversión. Tal es el caso de los proyectos de BRT que han tenido relevancia en los más recientes años en la región, llegando a tener más de 20 millones de pasajeros al día en 53 ciudades.

**Cuadro 2**  
**Numeralia de BRTs en operación en Latinoamérica**

País	Pasajeros por día	Números de ciudades	Longitud (Km)
Argentina	1 717 000	3	76
Brazil	10 681 654	21	765
Chile	476 800	2	105
Colombia	3 071 541	7	225
Ecuador	1 055 000	2	117
El Salvador	27 000	1	6
Guatemala	210 000	1	24
México	2 652 204	11	394
Perú	350 000	1	26
Uruguay	25 000	1	6
Venezuela (República Bolivariana de)	240 778	3	42
Totales	20 506 977	53	1 786

Fuente: Elaboración del autor sobre la base de Global BRT Data [<https://brtdata.org/>].



### III. Herramienta de evaluación socioeconómica

Para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero el presente estudio se enfoca en los proyectos de transporte público como principal medio de movilidad en Latinoamérica y evalúa la factibilidad de implementar sistemas de transporte público bajo en emisiones o con tendencia a cero emisiones. Dicha evaluación se estimará mediante el costo comparativo de implementar flotas de autobuses de diferentes tecnologías, para lo cual se propone la siguiente herramienta.

El objetivo principal de la herramienta es evaluar alternativas de proyectos de inversión de autobuses de transporte público de pasajeros que cuentan con diferentes tecnologías para promover la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo cual el resultado principal de la herramienta reside en el costo de inversión asociado a cada tecnología.

#### A. Restricciones y limitaciones

La herramienta de simulación de precios sociales de carbono sobre proyectos de transporte público se acota dentro de los siguientes parámetros:

- Evalúa solo proyectos comparables en condiciones del servicio a prestar, es decir, no compara proyectos que no ofrezcan la solución requerida como demanda, velocidad, ruta, etc.
- La herramienta evalúa proyectos que tienen los mismos beneficios generales como: tiempo de viaje, personas transportadas, externalidades positivas de incidentes viales, por lo cual no realiza la comparación de beneficios iguales. Las principales variantes residen en los costos asociados a la implementación de diferentes tecnologías que permiten la reducción de emisiones contaminantes.

- Evalúa proyectos de autobuses<sup>4</sup>. La mayor parte de transporte público en Latinoamérica se encuentra en este tipo de servicio, por lo cual los parámetros de evaluación establecidos fueron desarrollados acorde a los costos y prestaciones que un proyecto de autobuses requiere.
- La herramienta es una evaluación de costos<sup>5</sup> socioeconómicos representados en valor presente neto (VPN) y convertidos a costos anuales equivalentes (CAE) que permiten una evaluación comparativa de proyectos con diferentes ciclos de vida.
- El ejercicio realizado fue hecho con una flota de 100 autobuses<sup>6</sup> y con condiciones normales de operación en un año.
- Todos los costos están representados en dólares americanos.

La herramienta puede ser adaptada para evaluar proyectos diferentes a autobuses, teniendo cuidado en considerar todos los elementos que sean comparables, así como sustraer o adicionar costos/beneficios que no se presentan en un sistema de autobuses, e.g. el servicio de balanceo de estaciones de bicicletas públicas que se requiere hacer por las noches o los beneficios asociados a la reducción de incidentes viales considerando un sistema de trenes totalmente segregado.

## B. Descripción de la herramienta

La herramienta<sup>7</sup> ofrece una evaluación socioeconómica<sup>8</sup> y financiera que compara los costos totales de proyectos de transporte público de autobuses bajos en carbono. Considera la información base de 7 tipos de autobuses de 12 metros de tecnologías diésel (EURO IV, V y VI), GNC, híbrida (EURO VI), eléctrica de baterías, eléctrica de carga de oportunidad (OppCharge<sup>9</sup>).

La herramienta se estructura en los siguientes tres elementos:

- i) Cuenta con información precargada del proyecto:
  - Tipo de combustible, tamaño, kilómetros de operación al día, días de operación al año, velocidad promedio, pasajeros máximos por unidad, tamaño de flota, reserva mínima, vida útil.
  - Costo por autobús, valor residual, tasa de interés, tasa de descuento, pago upfront<sup>10</sup>, años de financiamiento.
    - Costos de combustibles (diésel, gas natural y energía), rendimientos por tipo de unidad.
    - Costos de salarios de operadores, número de operadores por unidad.
    - Costos de seguros.
    - Costos de mantenimiento (menor) por mano de obra y piezas.

---

<sup>4</sup> La herramienta puede tener una adaptación a otro tipo de modos de transporte.

<sup>5</sup> Al considerar proyectos con mismos beneficios no son considerados en la herramienta.

<sup>6</sup> La herramienta puede utilizarse para cualquier tamaño de flota; sin embargo, es recomendable tener cuidado con los parámetros de costos que representan las economías a escala.

<sup>7</sup> La herramienta se encuentra disponible para uso de las instituciones de gobierno interesadas y puede ser solicitada al correo [ddsah@cepal.org](mailto:ddsah@cepal.org).

<sup>8</sup> Dado que incluye el costo ambiental a través del precio social del carbono.

<sup>9</sup> E.g.: autobús volvo de carga de oportunidad, <https://www.volvobuses.mx/es-mx/news/2017/may/volvo-buses-en-uitp.html>.

<sup>10</sup> Pago que se realiza al inicio de un financiamiento.

- Costo de mantenimiento mayor (overhaul), periodicidad.
  - Infraestructura por tipo de unidad.
  - Factores de emisión ambientales.
- ii) Realiza cálculos de valores presentes netos (VPN) sobre los costos de los siguientes rubros:
- Costo de unidades (flota). Considera el valor promedio de mercado en USD para cada tipo de unidad.
  - Costo de combustibles. Considera el valor del combustible a utilizar por cada tecnología conforme al rendimiento.
  - Costo de salarios. Representa el costo de los operadores de transporte dado el grado de profesionalización requerido.
  - Seguros. Representa el costo de aseguramiento de la flota.
  - Mantenimiento. Calcula el costo de mantenimiento rutinario de cada unidad, considerando mano de obra y piezas de repuesto.
  - Overhaul. Calcula el costo de mantenimiento mayor dependiendo la periodicidad de cada tecnología.
  - Infraestructura. Considera los costos asociados a la tecnología específica como estaciones de servicio, recarga de energía o compresoras de combustible.
  - Ambientales. Considera el costo anual de las emisiones CO<sub>2</sub><sup>11</sup> derivadas de cada tecnología.
- iii) Realiza la evaluación socioeconómica de proyectos. Cada concepto descrito anteriormente es expresado en valor presente neto (VPN) y calcula el costo anual equivalente (CAE) total y desglosado para cada concepto.

## C. Escenarios de evaluación de PSC

Se realizaron escenarios con diversos precios de toneladas de carbono para evaluar los cambios en los costos anuales equivalentes de las diferentes alternativas de flotas de autobuses. Los escenarios evaluados son \$5, \$10, \$20, \$30 y \$50 dólares por tonelada de carbono.

Datos básicos de inicio<sup>12</sup>

- Flota de 100 autobuses 12 metros para 90 pasajeros
- Costo de litro de Diésel \$1.1 dólares
- Costo de litro de GNC \$0.4 dólares
- Costo de Kwh \$0.07 dólares

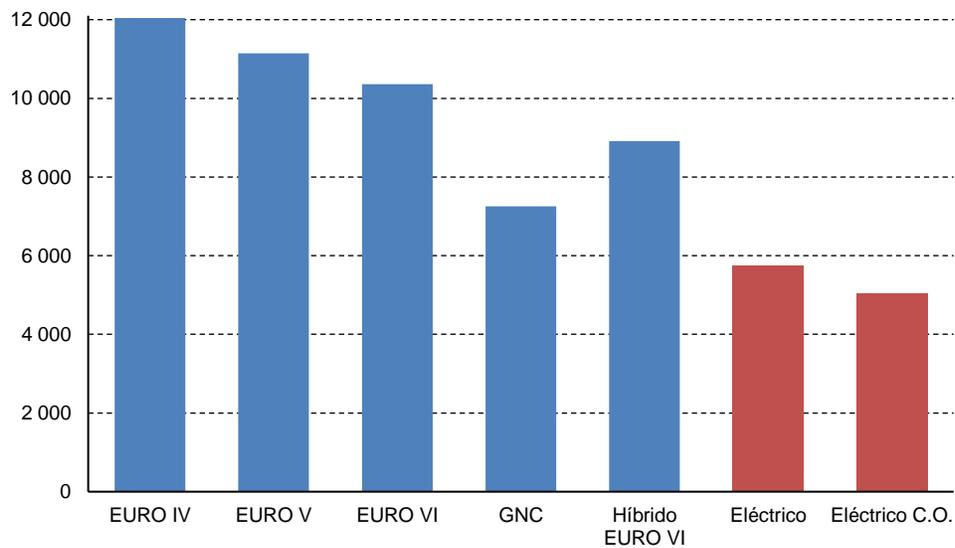
Para todos los escenarios de diferentes precios sociales de carbono, las emisiones contaminantes se mantienen constantes, tal como aparecen en las siguientes gráficas. Valores anuales.

---

<sup>11</sup> No considera CO<sub>2</sub> equivalente de otros gases de efecto invernadero.

<sup>12</sup> Los datos de inicio son referencias que pueden ser actualizadas en la herramienta.

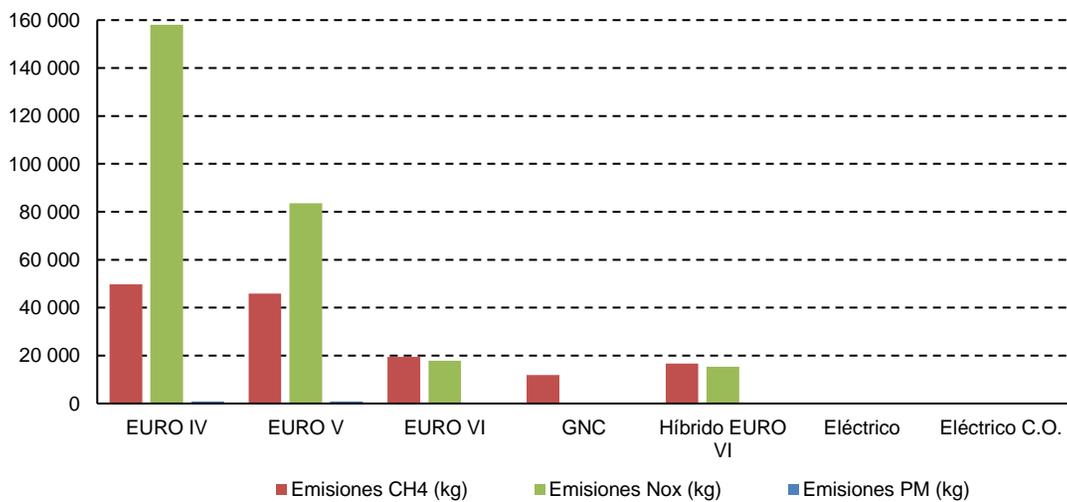
**Gráfico 1**  
Emisiones CO<sub>2</sub>, toneladas anuales  
(En toneladas)



Fuente: Elaboración del autor con base en la comparación de las tecnologías evaluadas.

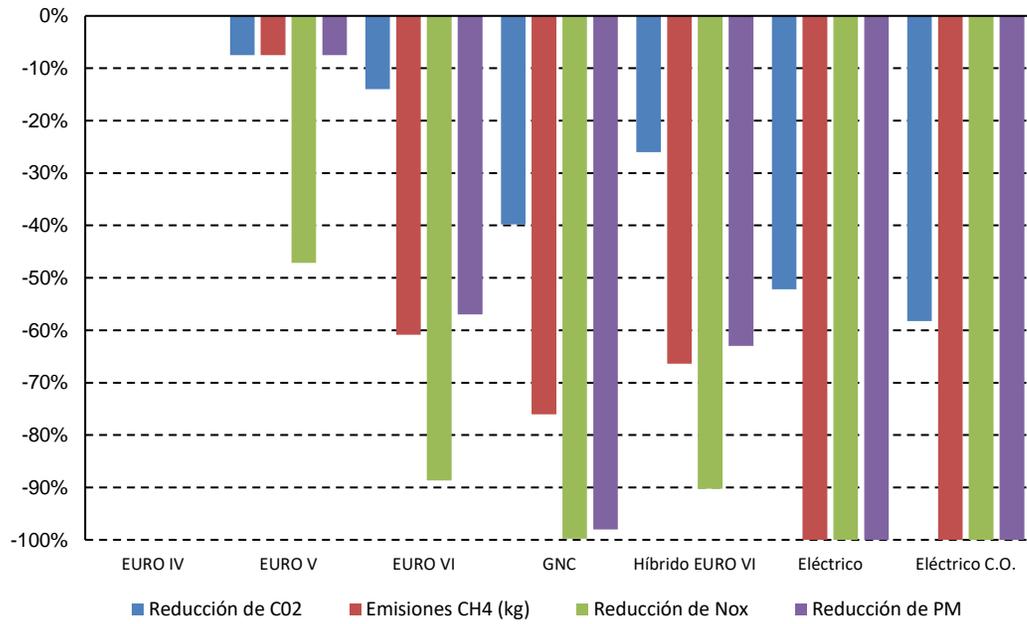
Los valores correspondientes a los autobuses eléctricos corresponden a la matriz energética de cada país. Aún cuando los autobuses eléctricos no producen contaminantes en la zona de operación, es importante representar los GEI que se generan dependiendo de la matriz energética de donde se alimentan. Para el caso representado se utilizó como ejemplo la matriz energética del caso mexicano correspondiente a 0.527 t CO<sub>2</sub>/MWh.

**Gráfico 2**  
Contaminantes criterio, anuales. Otros contaminantes  
(En toneladas)



Fuente: Elaboración del autor con base en la comparación de las tecnologías evaluadas.

**Gráfico 3**  
**Reducción porcentual de contaminantes respecto a la tecnología base**



Fuente: Elaboración del autor con base en la comparación de las tecnologías evaluadas.

A continuación, se presentan los escenarios económicos de VPN y CAE correspondiente a cada PSC.

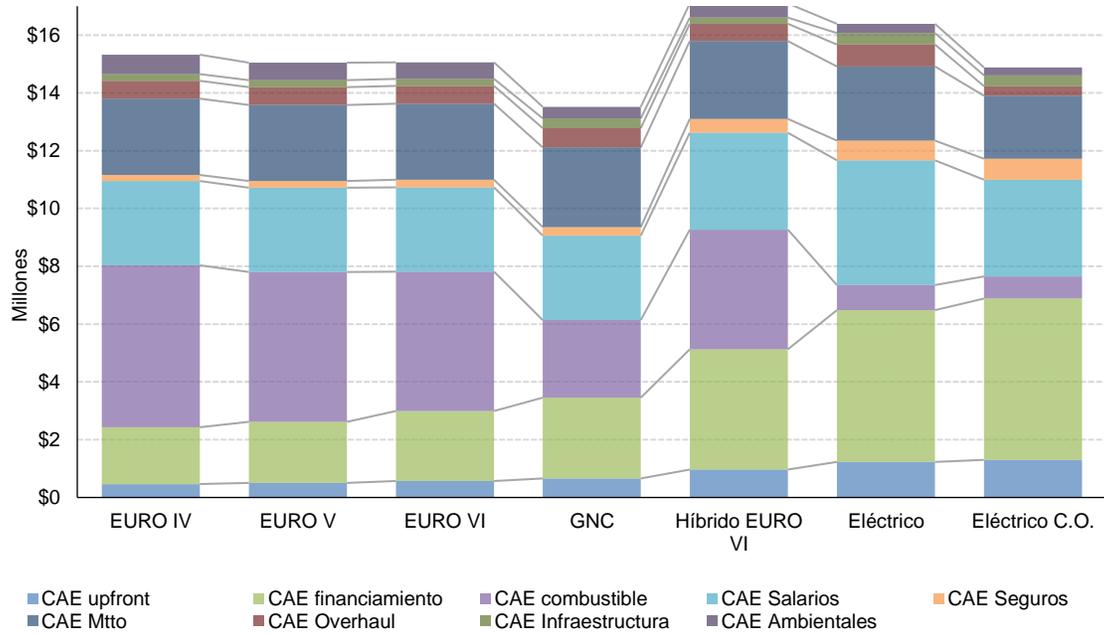
## 1. Precio social de tonelada de carbono \$5 USD

Cuadro 3  
VPN y CAE de PSC a 5 dólares

Valores presentes	EURO IV	EURO V	EURO VI	GNC	Híbrido EURO VI	Eléctrico	Eléctrico C.O.
1. VPN pago upfront USD	\$2 860 000	\$3 080 000	\$3 520 000	\$4 070 000	\$6 600 000	\$9 324 000	\$9 900 000
2. VPN Valor residual USD	\$882 123	\$949 979	\$1 085 690	\$1 255 329	\$1 997 815	\$1 897 278	\$2 014 484
3. VPN Financiamiento USD	\$12 076 838	\$13 005 826	\$14 863 801	\$17 186 270	\$28 306 159	\$39 988 882	\$42 459 238
4. VPN Combustible	\$34 433 755	\$31 851 224	\$29 629 045	\$16 471 221	\$28 255 780	\$6 637 805	\$5 794 909
5. VPN Salarios	\$17 953 657	\$17 953 657	\$17 953 657	\$17 953 657	\$22 836 514	\$32 786 956	\$25 492 251
6. VPN Seguros	\$1 278 925	\$1 377 304	\$1 574 062	\$1 820 009	\$3 272 761	\$5 161 204	\$5 480 042
7. VPN Mantenimiento	\$16 189 390	\$16 189 390	\$16 189 390	\$16 939 223	\$18 338 830	\$19 538 215	\$16 625 764
8. VPN Overhaul	\$3 810 941	\$3 810 941	\$3 810 941	\$4 093 178	\$4 093 178	\$5 775 978	\$2 502 388
9. VPN Infraestructura	\$1 450 000	\$1 450 000	\$1 450 000	\$2 080 000	\$1 450 000	\$3 030 000	\$2 825 000
10. VPN Ambientales (PS Carbono)	\$407 052	\$376 523	\$350 254	\$245 104	\$334 020	\$240 968	\$210 369
Valor presente neto (en dólares)	-\$89 578 436	-\$88 144 886	-\$88 255 461	-\$79 603 332	-\$111 489 427	-\$120 586 731	-\$109 275 477
Costo anual equivalente (en dólares)	-\$14 578 478	-\$14 345 174	-\$14 363 170	-\$12 955 076	-\$16 362 558	-\$15 853 993	-\$14 366 860
CAE upfront	\$465 452	\$501 256	\$572 864	\$662 374	\$968 638	\$1 225 861	\$1 301 590
CAE Residual	-\$143 561	-\$154 605	-\$176 691	-\$204 299	-\$293 206	-\$249 442	-\$264 852
CAE financiamiento	\$1 965 450	\$2 116 638	\$2 419 015	\$2 796 986	\$4 154 306	\$5 257 489	\$5 582 276
CAE combustible	\$5 603 935	\$5 183 640	\$4 821 991	\$2 680 615	\$4 146 912	\$872 697	\$761 879
CAE Salarios	\$2 921 875	\$2 921 875	\$2 921 875	\$2 921 875	\$3 351 563	\$4 310 625	\$3 351 563
CAE Seguros	\$208 139	\$224 150	\$256 171	\$296 198	\$480 321	\$678 563	\$720 482
CAE Mtto	\$2 634 749	\$2 634 749	\$2 634 749	\$2 756 780	\$2 691 467	\$2 568 763	\$2 185 852
CAE Overhaul	\$620 213	\$620 213	\$620 213	\$666 146	\$600 728	\$759 390	\$328 998
CAE Infraestructura	\$235 981	\$235 981	\$235 981	\$338 510	\$212 807	\$398 366	\$371 413
CAE Ambientales	\$66 246	\$61 277	\$57 002	\$39 890	\$49 022	\$31 681	\$27 658

Fuente: Estimaciones del autor con base en simulaciones para un PSC de \$5 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Gráfico 4**  
CAE PSC a 5USD



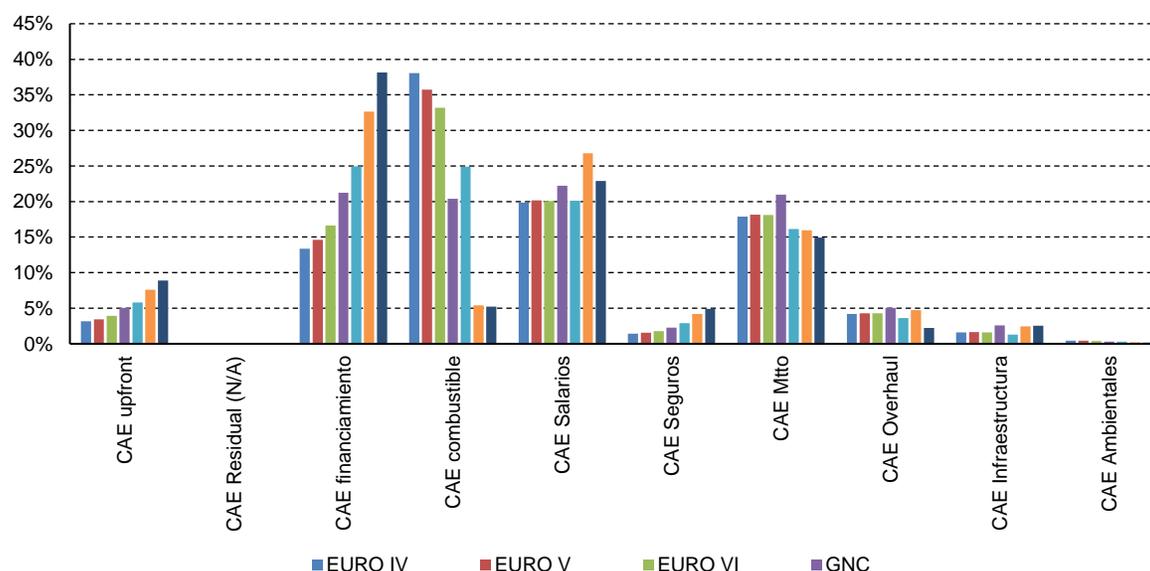
Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$5 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Cuadro 4**  
Peso porcentual de cada elemento en el CAE por tecnología, PSC 5 USD

	EURO IV	EURO V	EURO VI	GNC	Híbrido EURO VI	Eléctrico	Eléctrico C.O.
CAE upfront	3%	3%	4%	5%	6%	8%	9%
CAE Residual (N/A)							
CAE financiamiento	13%	15%	17%	21%	25%	33%	38%
CAE combustible	38%	36%	33%	20%	25%	5%	5%
CAE Salarios	20%	20%	20%	22%	20%	17%	23%
CAE Seguros	1%	2%	2%	2%	3%	4%	5%
CAE Mtto	18%	18%	18%	21%	16%	16%	15%
CAE Overhaul	4%	4%	4%	5%	4%	5%	2%
CAE Infraestructura	2%	2%	2%	3%	1%	2%	3%
CAE Ambientales	0.45%	0.42%	0.39%	0.30%	0.29%	0.20%	0.19%

Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$5 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Gráfico 5**  
CAE en porcentaje por rubro, para cada tecnología PSC 5USD  
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$5 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

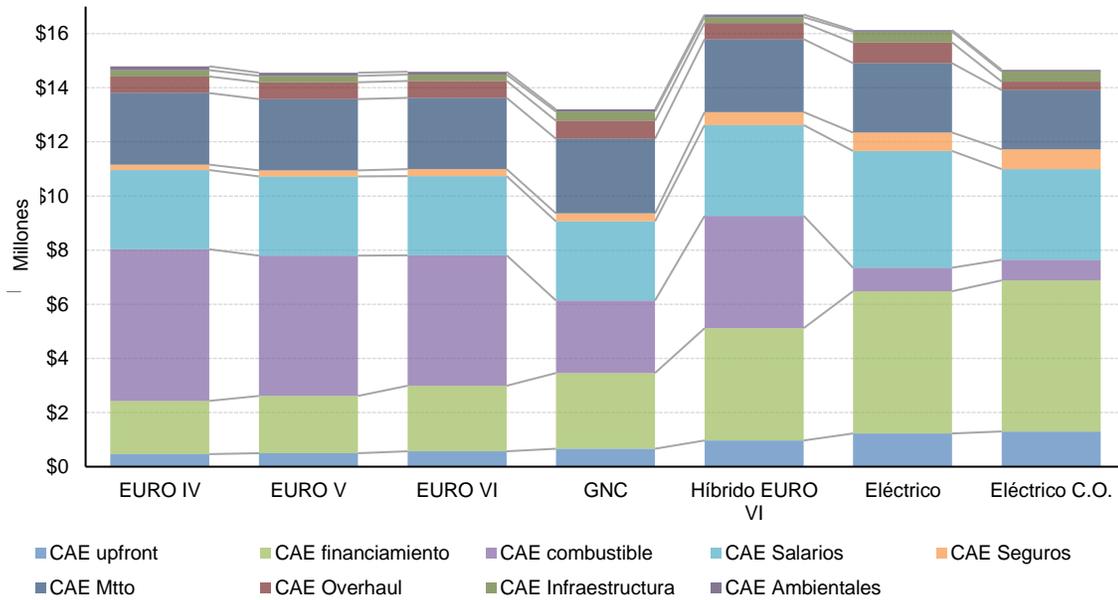
## 2. Precio social de tonelada de carbono \$10 USD

**Cuadro 5**  
VPN y CAE de PSC a 10 USD

Valores presentes	EURO IV	EURO V	EURO VI	GNC	Híbrido EURO VI	Eléctrico	Eléctrico C.O.
8. VPN Ambientales (PS Carbono)	\$814 104	\$753 046	\$700 508	\$490 207	\$668 040	\$481 936	\$420 738
Valor presente neto USD	-\$89 985 488	-\$88 521 409	-\$88 605 714	-\$79 848 436	-\$111 823 447	-\$120 827 699	-\$109 485 846
Costo Anual Equivalente USD	-\$14 644 724	-\$14 406 452	-\$14 420 172	-\$12 994 965	-\$16 411 580	-\$15 885 674	-\$14 394 518
CAE upfront	\$465 452	\$501 256	\$572 864	\$662 374	\$968 638	\$1 225 861	\$1 301 590
CAE Residual	-\$143 561	-\$154 605	-\$176 691	-\$204 299	-\$293 206	-\$249 442	-\$264 852
CAE financiamiento	\$1 965 450	\$2 116 638	\$2 419 015	\$2 796 986	\$4 154 306	\$5 257 489	\$5 582 276
CAE combustible	\$5 603 935	\$5 183 640	\$4 821 991	\$2 680 615	\$4 146 912	\$872 697	\$761 879
CAE Salarios	\$2 921 875	\$2 921 875	\$2 921 875	\$2 921 875	\$3 351 563	\$4 310 625	\$3 351 563
CAE Seguros	\$208 139	\$224 150	\$256 171	\$296 198	\$480 321	\$678 563	\$720 482
CAE Mto	\$2 634 749	\$2 634 749	\$2 634 749	\$2 756 780	\$2 691 467	\$2 568 763	\$2 185 852
CAE Overhaul	\$620 213	\$620 213	\$620 213	\$666 146	\$600 728	\$759 390	\$328 998
CAE Infraestructura	\$235 981	\$235 981	\$235 981	\$338 510	\$212 807	\$398 366	\$371 413
CAE Ambientales	\$132 492	\$122 555	\$114 004	\$79 779	\$98 044	\$63 362	\$55 316

Fuente: Estimaciones del autor con base en simulaciones para un PSC de \$10 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Gráfico 6**  
CAE PSC a 10 USD



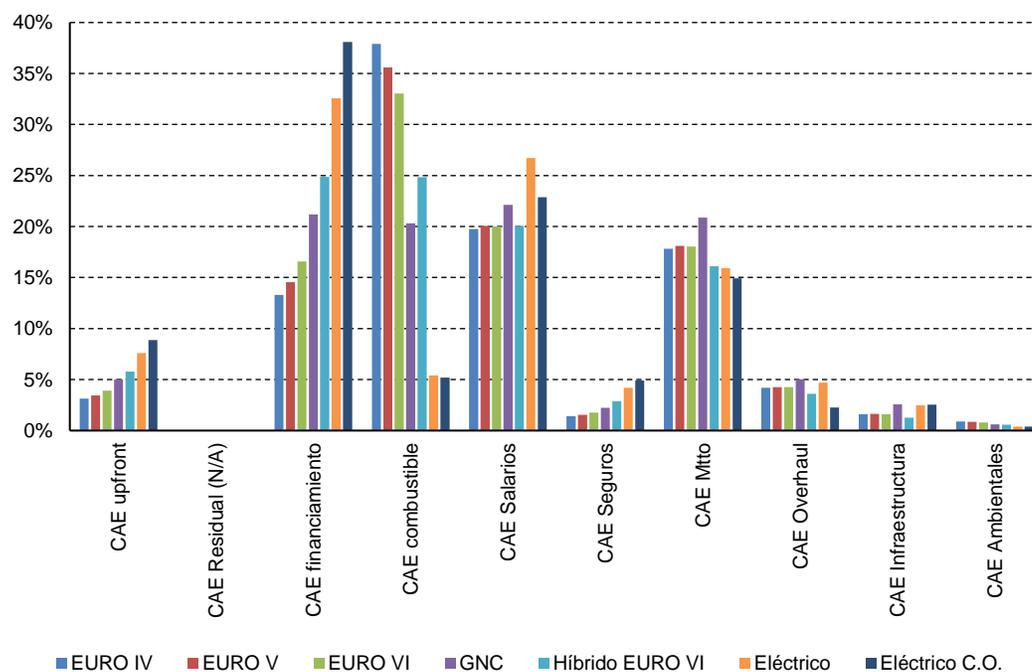
Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$10 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Cuadro 6**  
Peso porcentual de cada elemento en el CAE por tecnología, PSC 10 USD

	EURO IV	EURO V	EURO VI	GNC	Híbrido EURO VI	Eléctrico	Eléctrico C.O.
CAE upfront	3%	3%	4%	5%	6%	8%	9%
CAE Residual (N/A)							
CAE financiamiento	13%	15%	17%	21%	25%	33%	38%
CAE combustible	38%	36%	33%	20%	25%	5%	5%
CAE Salarios	20%	20%	20%	22%	20%	17%	23%
CAE Seguros	1%	2%	2%	2%	3%	4%	5%
CAE Mto	18%	18%	18%	21%	16%	16%	15%
CAE Overhaul	4%	4%	4%	5%	4%	5%	2%
CAE Infraestructura	2%	2%	2%	3%	1%	2%	3%
CAE Ambientales	0.90%	0.84%	0.78%	0.60%	0.59%	0.39%	0.38%

Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$10 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Gráfico 7**  
**CAE en porcentaje por rubro para cada tecnología PSC 10 USD**  
*(En porcentajes)*



Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$10 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

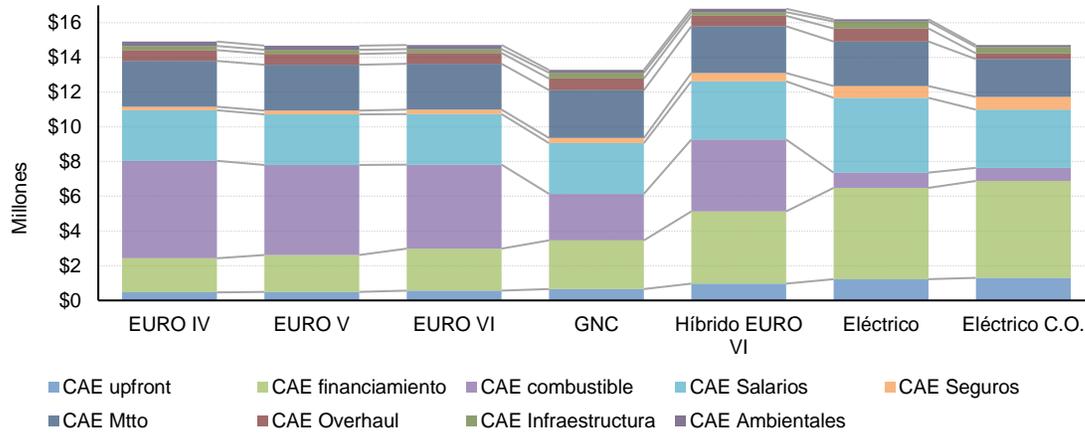
### 3. Precio social de tonelada de carbono \$20 USD

**Cuadro 7**  
**VPN y CAE de PSC a 20 USD**

Valores presentes	EURO IV	EURO V	EURO VI	GNC	Híbrido EURO VI	Eléctrico	Eléctrico C.O.
8. VPN	\$1 628 207	\$1 506 092	\$1 401 016	\$980 415	\$1 336 080	\$963 871	\$841 475
Ambientales (PS Carbono)							
Valor presente neto USD	-\$90 799 592	-\$89 274 455	-\$89 306 222	-\$80 338 644	-\$112 491 487	-\$121 309 634	-\$109 906 584
Costo Anual Equivalente USD	-\$14 777 215	-\$14 529 006	-\$14 534 176	-\$13 074 744	-\$16 509 624	-\$15 949 036	-\$14 449 834
CAE upfront	\$465 452	\$501 256	\$572 864	\$662 374	\$968 638	\$1 225 861	\$1 301 590
CAE Residual	-\$143 561	-\$154 605	-\$176 691	-\$204 299	-\$293 206	-\$249 442	-\$264 852
CAE financiamiento	\$1 965 450	\$2 116 638	\$2 419 015	\$2 796 986	\$4 154 306	\$5 257 489	\$5 582 276
CAE combustible	\$5 603 935	\$5 183 640	\$4 821 991	\$2 680 615	\$4 146 912	\$872 697	\$761 879
CAE Salarios	\$2 921 875	\$2 921 875	\$2 921 875	\$2 921 875	\$3 351 563	\$4 310 625	\$3 351 563
CAE Seguros	\$208 139	\$224 150	\$256 171	\$296 198	\$480 321	\$678 563	\$720 482
CAE Mitto	\$2 634 749	\$2 634 749	\$2 634 749	\$2 756 780	\$2 691 467	\$2 568 763	\$2 185 852
CAE Overhaul	\$620 213	\$620 213	\$620 213	\$666 146	\$600 728	\$759 390	\$328 998
CAE Infraestructura	\$235 981	\$235 981	\$235 981	\$338 510	\$212 807	\$398 366	\$371 413
CAE Ambientales	\$264 983	\$245 109	\$228 009	\$159 558	\$196 088	\$126 724	\$110 632

Fuente: Estimaciones del autor con base en simulaciones para un PSC de \$20 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Gráfico 8**  
CAE PSC a 20USD



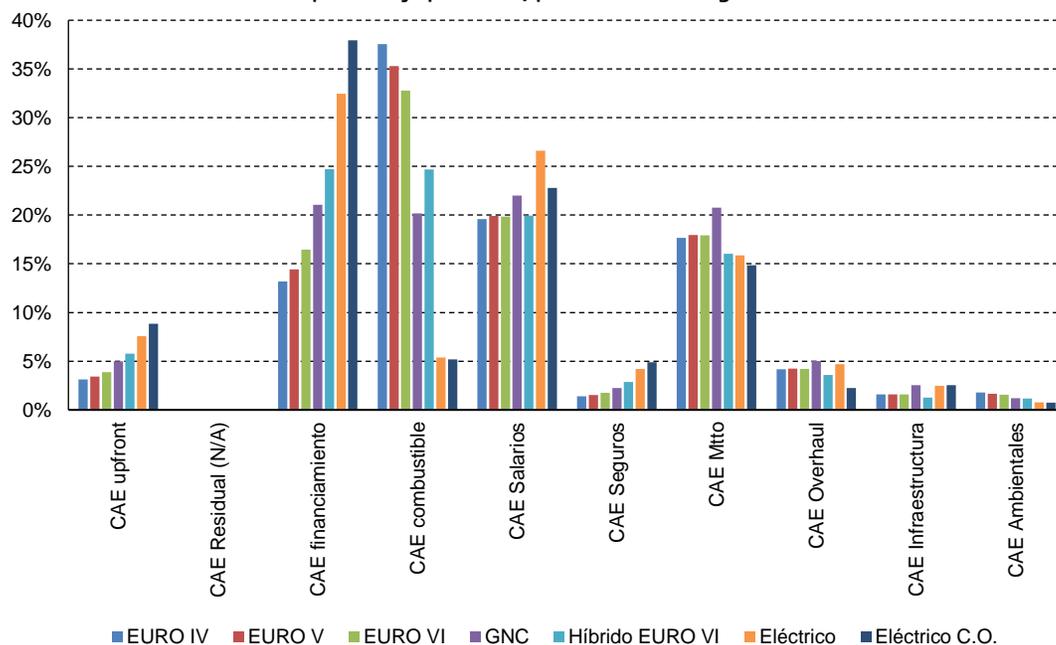
Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$20 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Cuadro 8**  
Peso porcentual de cada elemento en el CAE por tecnología, PSC 20 USD

	EURO IV	EURO V	EURO VI	GNC	Híbrido EURO VI	Eléctrico	Eléctrico C.O.
CAE upfront	3%	3%	4%	5%	6%	8%	9%
CAE Residual (N/A)							
CAE financiamiento	13%	14%	16%	21%	25%	32%	38%
CAE combustible	38%	35%	33%	20%	25%	5%	5%
CAE Salarios	20%	20%	20%	22%	20%	27%	23%
CAE Seguros	1%	2%	2%	2%	3%	4%	5%
CAE Mtto	18%	18%	18%	21%	16%	16%	15%
CAE Overhaul	4%	4%	4%	5%	4%	5%	2%
CAE Infraestructura	2%	2%	2%	3%	1%	2%	3%
CAE Ambientales	1.78%	1.67%	1.55%	1.20%	1.17%	0.78%	0.75%

Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$20 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

Gráfico 9  
CAE en porcentaje por rubro, para cada tecnología PSC 20USD



Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$20 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

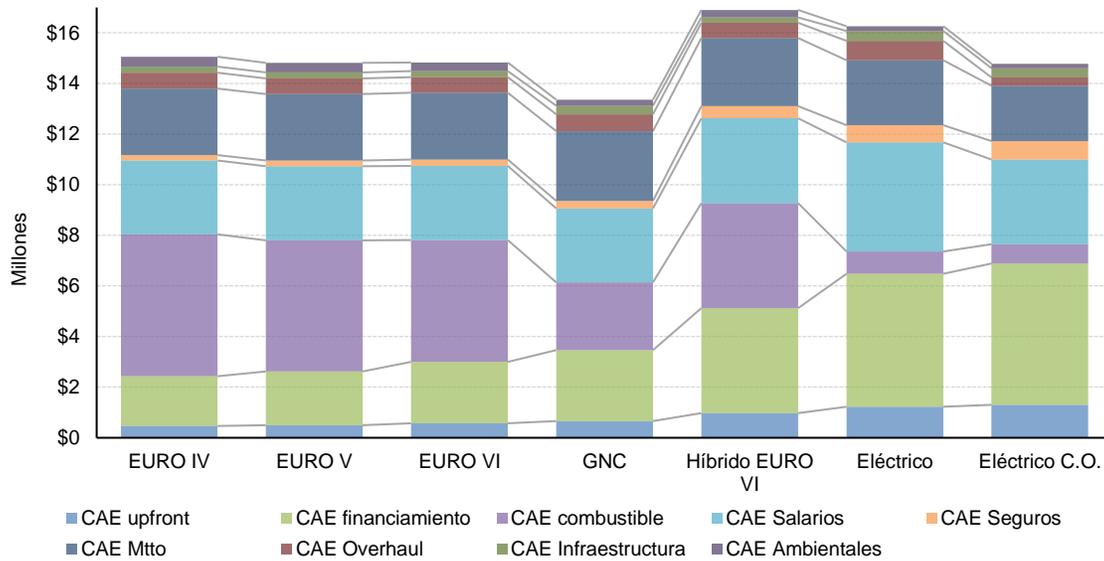
#### 4. Precio social de tonelada de carbono \$30 USD

Cuadro 9  
VPN y CAE de PSC a 30 USD

Valores presentes	EURO IV	EURO V	EURO VI	GNC	Híbrido EURO VI	Eléctrico	Eléctrico C.O.
8. VPN Ambientales (PS Carbono)	\$2 442 311	\$2 259 138	\$2 101 523	\$1 470 22	\$2 004 121	\$1 445 807	\$1 262 213
Valor presente neto USD	-\$91 613 695	-\$90 027 501	-\$90 006 730	-\$80 828 851	-\$113 159 527	-\$121 791 570	-\$110 327 321
Costo Anual Equivalente USD	-\$14 909 707	-\$14 651 561	-\$14 648 181	-\$13 154 523	-\$16 607 667	-\$16 012 398	-\$14 505 150
CAE upfront	\$465 452	\$501 256	\$572 864	\$662 374	\$968 638	\$1 225 861	\$1 301 590
CAE Residual	-\$143 561	-\$154 605	-\$176 691	-\$204 299	-\$293 206	-\$249 442	-\$264 852
CAE financiamiento	\$1 965 450	\$2 116 638	\$2 419 015	\$2 796 986	\$4 154 306	\$5 257 489	\$5 582 276
CAE combustible	\$5 603 935	\$5 183 640	\$4 821 991	\$2 680 615	\$4 146 912	\$872 697	\$761 879
CAE Salarios	\$2 921 875	\$2 921 875	\$2 921 875	\$2 921 875	\$3 351 563	\$4 310 625	\$3 351 563
CAE Seguros	\$208 139	\$224 150	\$256 171	\$296 198	\$480 321	\$678 563	\$720 482
CAE Mitto	\$2 634 749	\$2 634 749	\$2 634 749	\$2 756 780	\$2 691 467	\$2 568 763	\$2 185 52
CAE Overhaul	\$620 213	\$620 213	\$620 213	\$666 146	\$600 728	\$759 390	\$328 998
CAE Infraestructura	\$235 981	\$235 981	\$235 981	\$338 510	\$212 807	\$398 366	\$371 413
CAE Ambientales	\$397 475	\$367 664	\$342 013	\$239 337	\$294 131	\$190 086	\$165 948

Fuente: Estimaciones del autor con base en simulaciones para un PSC de \$30 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Gráfico 10**  
CAE PSC a 30 USD, costo anual equivalente por rubro 30USD



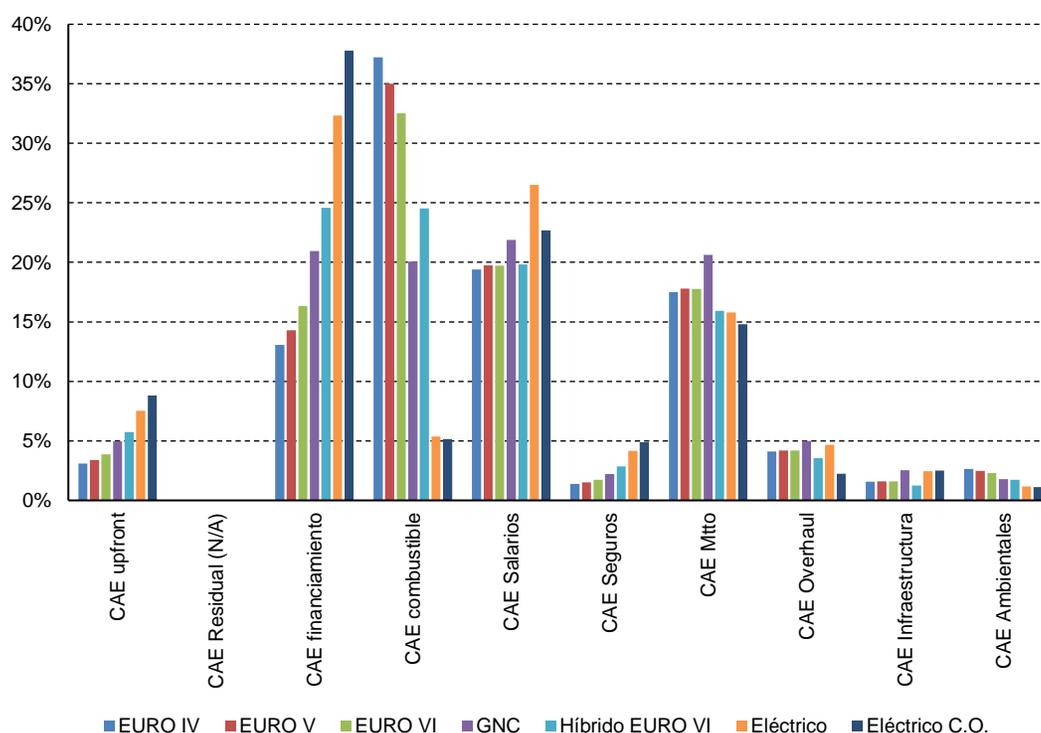
Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$30 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Cuadro 10**  
Peso porcentual de cada elemento en el CAE por tecnología, PSC 30 USD

	EURO IV	EURO V	EURO VI	GNC	Híbrido EURO VI	Eléctrico	Eléctrico C.O.
CAE upfront	3%	3%	4%	5%	6%	8%	9%
CAE Residual (N/A)							
CAE financiación	13%	14%	16%	21%	25%	32%	38%
CAE combustible	37%	35%	33%	20%	25%	5%	5%
CAE Salarios	19%	20%	20%	22%	20%	17%	23%
CAE Seguros	1%	2%	2%	2%	3%	4%	5%
CAE Mitto	18%	18%	18%	21%	16%	16%	15%
CAE Overhaul	4%	4%	4%	5%	4%	5%	2%
CAE Infraestructura	2%	2%	2%	3%	1%	2%	3%
CAE Ambientales	2.64%	2.48%	2.31%	1.79%	1.74%	1.17%	1.12%

Fuente: Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$30 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Gráfico 11**  
CAE en porcentaje por rubro, para cada tecnología PSC 30USD



Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$30 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

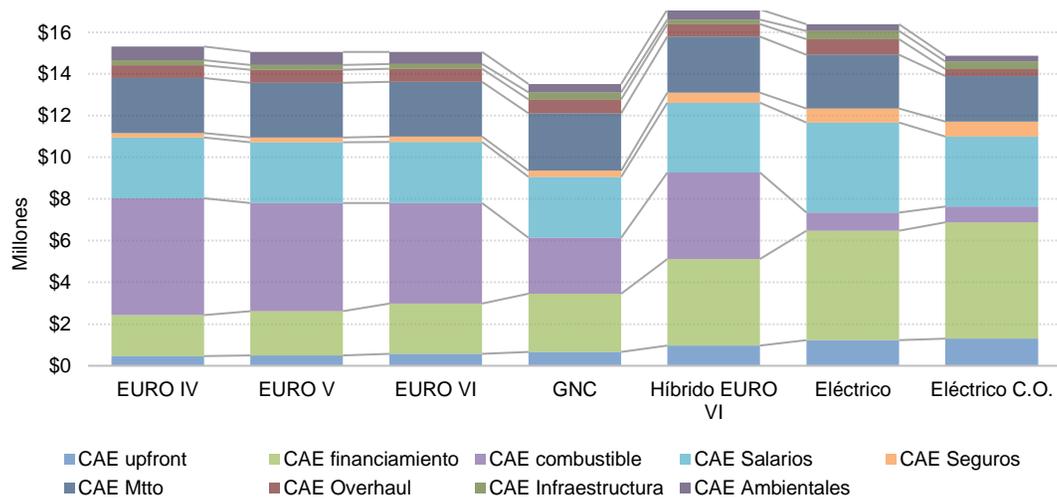
## 5. Precio social de tonelada de carbono \$50 USD

**Cuadro 11**  
VPN y CAE de PSC a 50 USD

Valores presentes	EURO IV	EURO V	EURO VI	GNC	Híbrido EURO VI	Eléctrico	Eléctrico C.O.
8. VPN Ambientales (PS Carbono)	\$4 070 518	\$3 765 229	\$3 502 539	\$2 451 037	\$3 340 201	\$2 409 679	\$2 103 688
Valor presente neto USD	-\$93 241 902	-\$91 533 593	\$91 407 745	\$81 809 266	-\$114 495 608	-\$122 755 441	-\$111 168 796
Costo Anual Equivalente USD	-\$15 174 690	-\$14 896 671	\$14 876 190	\$13 314 081	-\$16 803 755	-\$16 139 122	-\$14 615 782
CAE upfront	\$465 452	\$501 256	\$572 864	\$662 374	\$968 638	\$1 225 861	\$1 301 590
CAE Residual	-\$143 561	-\$154 605	-\$176 691	-\$204 299	-\$293 206	-\$249 442	-\$264 852
CAE financiamiento	\$1 965 450	\$2 116 638	\$2 419 015	\$2 796 986	\$4 154 306	\$5 257 489	\$5 582 276
CAE combustible	\$5 603 935	\$5 183 640	\$4 821 991	\$2 680 615	\$4 146 912	\$872 697	\$761 879
CAE Salarios	\$2 921 875	\$2 921 875	\$2 921 875	\$2 921 875	\$3 351 563	\$4 310 625	\$3 351 563
CAE Seguros	\$208 139	\$224 150	\$256 171	\$296 198	\$480 321	\$678 563	\$720 482
CAE Mito	\$2 634 749	\$2 634 749	\$2 634 749	\$2 756 780	\$2 691 467	\$2 568 763	\$2 185 852
CAE Overhaul	\$620 213	\$620 213	\$620 213	\$666 146	\$600 728	\$759 390	\$328 998
CAE Infraestructura	\$235 981	\$235 981	\$235 981	\$338 510	\$212 07	\$398 366	\$371 413
CAE Ambientales	\$662 458	\$612 774	\$570 022	\$398 895	\$490 219	\$316 810	\$276 580

Fuente: Estimaciones del autor con base en simulaciones para un PSC de \$50 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Gráfico 12**  
CAE PSC a 50USD



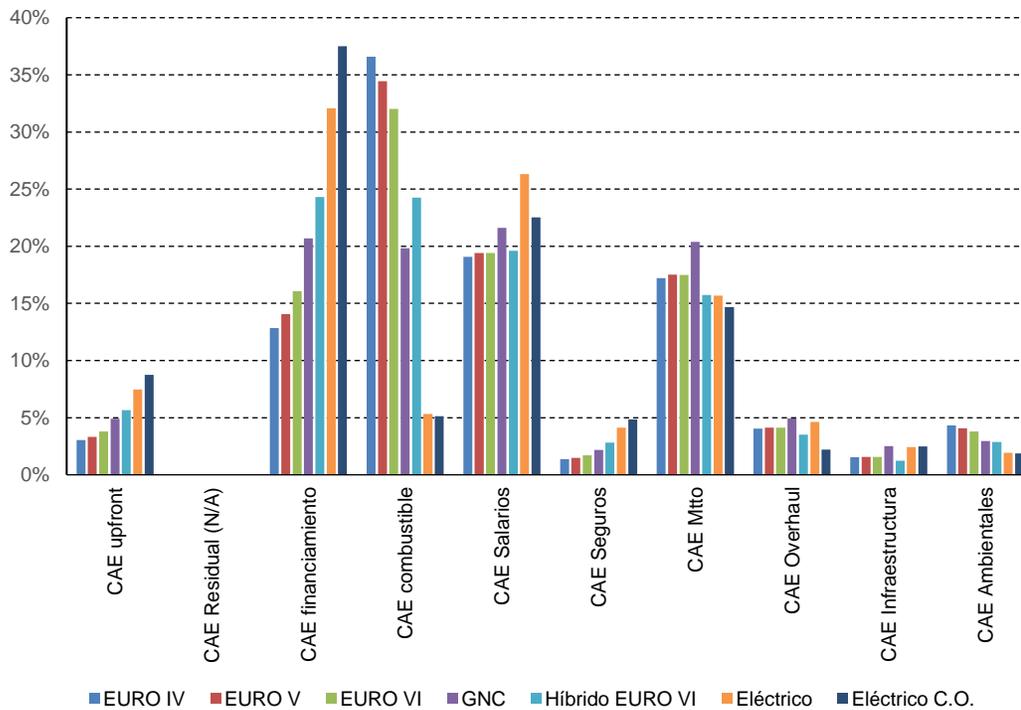
Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$50 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Cuadro 12**  
Peso porcentual de cada elemento en el CAE por tecnología, PSC 50 USD

	EURO IV	EURO V	EURO VI	GNC	Híbrido EURO VI	Eléctrico	Eléctrico C.O.
CAE upfront	3%	3%	4%	5%	6%	7%	9%
CAE Residual (N/A)							
CAE financiamiento	13%	14%	16%	21%	24%	32%	38%
CAE combustible	37%	34%	32%	20%	24%	5%	5%
CAE Salarios	19%	19%	19%	22%	20%	16%	23%
CAE Seguros	1%	1%	2%	2%	3%	4%	5%
CAE Mto	17%	18%	18%	20%	16%	16%	15%
CAE Overhaul	4%	4%	4%	5%	4%	5%	2%
CAE Infraestructura	2%	2%	2%	3%	1%	2%	2%
CAE Ambientales	4.32%	4.07%	3.79%	2.95%	2.87%	1.93%	1.86%

Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$50 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

**Gráfico 13**  
CAE en porcentaje por rubro, PSC 50USD



Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones para un PSC de \$50 USD para las distintas tecnologías evaluadas.

## D. Análisis de escenarios

En el apartado anterior se realizaron varios ejercicios de simulación de diferentes precios sociales de carbono dentro de una estructura de evaluación socioeconómica de proyectos, considerando únicamente costos de las diferentes tecnologías.

De las siete tecnologías evaluadas pueden resaltarse las siguientes conclusiones:

- i) La composición de costos de un proyecto de transporte público tiene diversos elementos que representan un porcentaje importante en su estructura. Principalmente los costos de adquisición de las unidades pueden llegar a representar desde un 16% hasta un 50% para autobuses diésel euro IV a eléctricos de baterías respectivamente. Por el contrario, el costo del combustible puede ir desde un 37% hasta un 5% para las mismas tecnologías. En suma, esos dos elementos para cualquiera de los casos representan más de la mitad de la estructura económica. Importante señalar que el costo de adquisición de unidades representa una fuerte carga al inicio del ciclo de proyecto, mientras que el combustible es un costo constante durante la vida útil.

- ii) Como segundo sector de importancia los costos de salarios fluctúan entre el 19% y 26% mientras que el costo de mantenimiento entre 15% y el 20%. Estos costos son importantes en la estructuración de un proyecto de formalización de transporte. En la mayoría de Latinoamérica el sector transporte público no está en condiciones empresariales, por lo que es común que no paguen impuestos, no tengan salarios estables para los operadores con beneficios y las unidades no se les hace el mantenimiento adecuado para conservar la calidad de un autobús. Al establecer un modelo empresarial estos costos representan hasta el 30% del modelo económico<sup>13</sup>.
- iii) Por los puntos anteriores, aún cuando los costos anuales equivalentes pueden llegar a ser similares entre las diferentes opciones de tecnología, la necesidad de financiamiento es sustancialmente distinta, además que los retornos de inversión (depende de la cuantificación de los beneficios<sup>14</sup>) tendrá un aplazamiento en el caso de las tecnologías que requieren mayor inversión inicial.
- iv) Los costos cuantificables de emisiones contaminantes por CO<sub>2</sub><sup>15</sup>, representan apenas un 4% para el caso donde la tonelada de carbono se cuantifica en 50USD, en la tecnología de mayor emisión. Este porcentaje es muy bajo en la estructura de costos, lo cual no resulta significativo por sí solo para el cambio de tecnología.
- v) En la estructura de costos no están considerados los contaminantes criterio que afectan a la calidad del aire. En la realidad estos representan un mayor determinante para la adopción de tecnologías de bajas emisiones. La mayoría de las ciudades y países que han decidido adoptar estas tecnologías basan sus decisiones en el fuerte beneficio que recibirán los habitantes por la mejora en la calidad del aire. Hay ciudades como la Ciudad de México que lo ha realizado a través de regulaciones ambientales que restringen la circulación, o casos de tarificación de zonas bajas emisiones para el caso de la ciudad de Londres.
- vi) Los contaminantes criterio pueden representar un fuerte incentivo para decidir sobre las tecnologías a adaptar, debido a que cuentan con fuertes restricciones de circulación, así tarificación y/o penalizaciones por circulación en ciertas zonas. Este incentivo, combinado con los contaminantes GEI, puede realmente ser un decisor en el mercado de los sistemas de transporte de bajas emisiones, al igual que cuenta con mayor aceptación de la ciudadanía y tomadores de decisión al ver los efectos localmente.
- vii) Es común considerar que las tecnologías eléctricas no tienen emisiones GEI, lo cual en general es un error. Para estos casos es necesario considerar los factores de emisión de consumo de la matriz energética de la ciudad o país, esto llevará a una comparación más justa entre las diferentes tecnologías evaluadas.
- viii) Los modelos actuales de evaluación de sistemas de transporte público no consideran todos los beneficios y costos.

---

<sup>13</sup> Nota: este modelo no considera costos respecto a la empresarización, tal como personal administrativo, directivo, legal, etc.

<sup>14</sup> Es posible que los proyectos no sean rentables, depende del tipo de proyecto, demanda, tarifa, otros ingresos, etc.

<sup>15</sup> No considera CO<sub>2</sub> equivalentes.



## IV. Reto de escalamiento en tecnologías

### A. Barreras de implementación detectadas

Es clara la tendencia que existe en el mundo hacia la adopción de tecnologías más limpias en sistemas de transporte. Sin embargo, solo las ciudades de mayor tradición en transporte de alta calidad han logrado migrar o están en el proceso de implementar tecnologías de bajas emisiones. En todos los casos se detectan barreras de implementación que son necesarias tener en cuenta y generar un plan para reducir o eliminar los riesgos.

- i) Conocimiento de las tecnologías. En general es común tener conversaciones sobre la necesidad de implementar tecnologías de nueva generación; sin embargo, el conocimiento que se tienen sobre éstas es bajo entre los tomadores de decisión, al igual que en los implementadores que desconocen de la información clave para tomar la decisión de comprar un autobús eléctrico, híbrido o GNC, o que jamás lo han visto en operación real bajo un ciclo de manejo completo.
- ii) Costo de las tecnologías. Las nuevas tecnologías tienen un mayor costo de adquisición a las convencionales. Tal vez este sea el mayor reto de inicio para la compra de flotas, debido al costo de financiamiento y retorno de inversión, además de la infraestructura no convencional que puedan requerir.
- iii) Modelo de operación diferentes. La implementación de tecnologías diferentes al diésel, llevan por igual al ajuste necesario en la operación, tanto en la autonomía, estaciones de recarga, eficiencia del combustible, patios de encierro, mecánica y refacciones, hasta el manejo y cuidado del autobús.

- iv) Empresarización e Instituciones de transporte. Principalmente para los países en desarrollo el reto consiste en primero generar sistemas de transporte con instituciones y empresas, seguidos de tecnologías que sean más limpias y eficientes. Es común que la transformación en Latinoamérica se intente de manera conjunta, profesionalización del sector a la par de adopción de tecnologías de vanguardia, lo cual genera mayor complejidad en la implementación de proyectos de bajas emisiones.
- v) Modelos de negocio más complejos. Como se ha mostrado en este documento, los modelos de análisis de adquisición de sistemas transporte son complejos. Al implementar tecnologías bajas en carbono se adquieren activos de mayor costo, lo cual lleva a la necesidad de financiamiento, así como de explorar nuevos modelos de negocio en donde terceras empresas asumen parte del modelo como la provisión de la infraestructura de combustible y energía ante el acuerdo de un contrato de compra del energético por determinado tiempo. Así también actualmente se exploran la renta de activos (autobuses), contrato sobre eficiencias de baterías (empresa terceriza su propiedad y reemplazo), etc.
- vi) Nuevos jugadores. El mercado de sistemas de transporte durante varias décadas tuvo a los mismos actores para cada sistema de transporte: fabricantes de unidades, fabricantes de tecnología de control, información y tarificación, proveedores de infraestructura de rodamiento y proveedores de combustible (principalmente Diésel y gasolinas), generalizando. Las nuevas tecnologías han atraído a nuevos actores, es común hoy ver a empresas de energía eléctrica y gaseras no solo proveyendo el combustible, sino participando en el modelo de prestación de servicio de los sistemas de transporte, así como podemos ver a grupos financieros que ven en los sistemas de transporte negocios de inversión a largo plazo.
- vii) Modelos de concesión y legales adecuados. Al haber más actores y recursos involucrados es necesario hacer ajustes a los modelos de concesión y legales de los sistemas de transporte, además de la distribución de riesgos y modelos legales que procuren la continuidad del servicio de transporte público en alta calidad y que, a la vez, respalden la inversión de todos los actores.
- viii) Ausencia de políticas públicas en la materia. Los sistemas de transporte público son esenciales en la vida diaria de cualquier ciudad, su calidad y cantidad están totalmente relacionada con el grado de desarrollo de la ciudad y economía, por lo cual las políticas públicas de las ciudades deben tender a favorecerlos y en cierta medida a subsidiarlos. Las principales barreras que encuentran los sistemas de transporte es la falta de incentivos para su implementación y mejoramiento, principalmente cuando se trata de la adopción de medidas por las que no es claro quién tiene que pagar, cómo son las medidas de accesibilidad, seguridad vial, frecuencia (cuándo no es rentable bajo la tarifa establecida) o las ambientales.

## V. Conclusiones y recomendaciones

### A. Generales, industria de sistemas de transporte bajos en emisiones

- i) Escalamiento. La adopción de flotas más limpias o cero emisiones depende en gran medida del volumen de unidades adquiridas. Es posible generar economías a escala que permitan la reducción de costos fijos, así como la reducción de costos de activos que aún tiene margen importante en las unidades, tal es el caso de las baterías. Entre más ciudades cuenten con flotas bajas en carbono, la industria tendrá mayores incentivos para su desarrollo, competencia y reducción de precios.
- ii) Desarrollo de la industria nacional y regional. Latinoamérica cuenta con un potencial muy alto para la adquisición de unidades de autobuses. Tradicionalmente se ha movido en este medio de transporte y ha establecido la industria en la región. Con más de medio millón de unidades en la región, existe un mercado atractivo para el establecimiento de empresas armadoras y productoras de unidades, que no solo se comercialicen en la región, sino también tengan atractivo para exportar a otros mercados como el norteamericano.
- iii) Combinación de incentivos. La tarificación del precio del carbono es un incentivo que promueve el cambio tecnológico, sin embargo, requiere del acompañamiento de otros incentivos económicos y regulatorios, tal es el caso de regulaciones de emisiones locales que mejoren la calidad del aire, restricciones de circulación en zonas de baja emisión, o incentivos económicos a la compra de vehículos eléctricos o híbridos.
- iv) Mercado de energías. La reducción de carbono tiene efectividad cuando la generación de la energía es limpia y de preferencia renovable. Algunas economías permiten la producción y comercialización de energías entre privados, esto genera una gran oportunidad para incentivar la producción y consumo de energías renovables en sistemas de transporte público, pudiendo establecer incentivos para el consumo mínimo de este tipo fuentes.

- v) Generación de capacidad y desarrollo del sector movilidad. La implementación de flotas bajas en carbono tiene una de sus principales barreras en la capacidad instalada en la planeación y toma de decisiones en las ciudades. Por lo cual es necesario invertir en la generación de capacidad humana, así como la formalización de instituciones que puedan planear los sistemas de transporte más allá de la perspectiva de operación, incluyendo por igual as políticas públicas necesarias, tal es el caso de las ambientales.
- vi) Participación de los gobiernos nacionales en la movilidad local. Regularmente los gobiernos locales son los responsables de los sistemas de movilidad, mientras que los nacionales de la política ambiental en materia de emisiones de gases de efecto invernadero. Esto genera una falla debido a que los incentivos y planes por lo regular no están alineados. El gobierno nacional debe buscar la generación de incentivos para que los gobiernos locales promuevan la adopción de tecnologías bajas en carbono. Regularmente los gobiernos nacionales establecen planes en la materia, incentivan y regulan la industria y ofrecen incentivos económicos directos a las ciudades que promuevan el cambio tecnológico.

## **B. Específicas, precio social de carbono en el transporte público**

- i) Precio social como único elemento de externalidad. Los sistemas de transporte producen varias externalidades; sin embargo, rara vez son cuantificadas en los modelos de evaluación socioeconómica. Particularmente las ambientales no están cuantificadas, ya sea en su costo consumo o en el beneficio de reducción. Es necesario incluirlas tal como se realizó en el ejercicio del presente documento, así como cuantificar las emisiones locales, ya sea como una restricción de circulación o incluso como una cuantificación económica.
- ii) Tercerización de activos. Es posible reducir costos de riesgos de tecnologías, o hacer economías a escala con la terciarización de activos como se ha intentado en el caso de los autobuses eléctricos. Es recomendable estudiar estos casos hoy en operación en China y Chile, que pueden ser impulso para la migración a tecnologías más limpias, así también atraer a nuevos inversores y capitalizar le sector.

## VI. Recomendaciones de política pública

### A. Institucionalización y empresarización

#### 1. Instituciones de transporte

Establecer y generar capacidad en instituciones de transporte público. Los gobiernos nacionales tienen una gran oportunidad en establecer un programa de capacitación para la instalación de instituciones de transporte público, si bien no es relación directa con flotas bajas en carbono, es una de las principales barreras para la adopción de sistemas de bajas emisiones.

Las instituciones establecidas, fuertes y capacitadas tienen mayores posibilidades de establecer y gestionar políticas públicas.

#### 2. Empresas de transporte

Establecer y generar capacidad para la formación de empresas de transporte público. La adopción de flotas bajas en carbono requiere de sistemas empresariales que les permitan generar modelos de negocios con ciclos de proyecto de largo plazo, diferente a las necesidades inmediatas del concesionario individual que predomina en Latinoamérica.

#### 3. Conocimiento de tecnologías

Establecer un programa de información y capacitación en nuevas tecnologías. Aún teniendo instituciones y empresas, la curva de aprendizaje e instalación de nuevas tecnologías requiere de conocimiento, exploración de requerimientos y "trade offs" (intercambios). El abatimiento de la curva con programas de capacitación podrá acelerar la implementación de sistemas de transporte bajos en emisiones.

## **B. Evaluación socioeconómica**

### **1. Métodos de evaluación**

Incorporar en los métodos de evaluación socioeconómica las externalidades derivadas de gases de efecto invernadero, considerando las equivalencias de CO<sub>2</sub> de todos los GEI producidos. Por igual es recomendable evaluar e incorporar en los métodos los contaminantes criterio que afectan la calidad del aire local.

## **C. Financiamiento**

### **1. Gobiernos nacionales/federales**

Establecer un programa de financiamiento de sistemas de transporte público bajo en emisiones. Para lograr acelerar la implementación de sistemas de transporte público con características de sustentabilidad en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, es recomendable la participación del gobierno nacional/federal para desde el financiamiento, principalmente del costo capital. Esto considerando que están cubiertas las necesidades institucionales y de empregarización, así como de evaluación económica mencionadas previamente. Los costos de operación deberán ser evaluados (preferentemente) por el gobierno local, es posible y natural la necesidad de subsidio a la operación debido a las características socioeconómicas de cada país.

### **2. Atracción de nuevos actores**

Ajustar los modelos de concesión y/o licitación para incorporar otros actores. Los sistemas de transporte de vanguardia en el mundo han diversificado la participación de actores en la procuración de sistemas de transporte. Para el caso de autobuses de bajas emisiones puede atraerse nuevos actores no tradicionales (ya sea relacionados o simplemente como socios capitales), que permitan financiar los costos capitales y operativos durante el ciclo de vida del proyecto. Esto requiere que las reglas del modelo de concesión del transporte consideren estos nuevos actores, así como la estructuración de un modelo de negocios que permita la generación de rentas para los socios capitalistas.

### **3. Bonos verdes**

Instrumentación de bonos verdes para proyectos de movilidad sustentable. La emisión de bonos verdes en Latinoamérica es incipiente; sin embargo, es una de las principales oportunidades que tiene el sector transporte para financiar proyectos mayúsculos que promuevan la reducción de emisiones contaminantes. Es recomendable que los bancos de desarrollo nacional instrumenten las medidas para la burzatilización de proyectos de movilidad sustentable, así como la atracción de capitales privados que puedan financiar proyectos verdes.

## Bibliografía

- Aldy, Joseph E. Long-Term Climate Policy: *The Great Carbon Swap*. PPI, 2016. Retrieved from <http://www.progressivepolicy.org/wp-content/uploads/2016/11/The-Great-Swap-1.pdf>.
- \_\_\_\_\_. "Pricing climate risk mitigation." *Nature Climate Change* 5, no. 5 (2015) 396-398. Retrieved from doi:10.1038/nclimate2540.
- Edenhofer, Ottmar, Michael Jakob, Felix Creutzig, Christian Flachsland, Sabine Fuss, Martin Kowarsch, Kai Lessmann, Linus Mattauch, Jan Siegmeier, and Jan Christoph Steckel. "Closing the Emission Price Gap." *Global Environmental Change* 31, (2015): 132-143.
- Yosu Rodríguez Aldabe, "Potenciar la resiliencia de las ciudades y sus territorios de pertenencia en el marco de los acuerdos sobre cambio climático y de la Nueva Agenda Urbana", Documentos de Proyectos (LC/TS.2018/91), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2018.
- Metcalfe, Gilbert E., and David Weisbach. "Linking policies when tastes differ: Global climate policy in a heterogeneous world." *Review of Environmental Economics and Policy* 6, no. 1 (2011): 110-129.
- Alicia Bárcena, Joseluis Samaniego, Luis Miguel Galindo, Jimy Ferrer Carbonell, José Eduardo Alatorre, Pauline Stockins, Orlando Reyes, Luis Sánchez, Jessica Mostacedo, "La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. Una visión gráfica" (LC/TS.2017/84/Rev.1), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2018.
- José E. Alatorre, Karina Caballero, Jimy Ferrer y Luis Miguel Galindo, "El costo social del carbono: una visión agregada desde América Latina", Documentos de Proyectos (LC/TS.2019/10), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2019.
- José E. Alatorre, Allan Beltrán, Jimy Ferrer y Luis Miguel Galindo, "Reformas fiscales ambientales e innovación y difusión tecnológicas en el contexto de las contribuciones determinadas (CDN): una visión desde América Latina", Documentos de Proyectos (LC/TS.2018/78), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2018.

El sector del transporte es una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente por los vehículos a motor terrestres. El transporte público en autobuses es el principal medio de movilidad en las ciudades latinoamericanas, en algunos casos superior al 50% del reparto modal. Este estudio evalúa la factibilidad de implementar sistemas de transporte público bajo en emisiones o con tendencia a emisiones cero, mediante el costo comparativo de implementar flotas de autobuses de diferentes tecnologías, incluido el precio social del carbono. Se desarrolla una herramienta que permite hacer una evaluación socioeconómica y financiera, comparando los costos totales de proyectos de transporte público con autobuses bajos en carbono. Se considera la información básica de siete tipos de autobuses de 12 metros con tecnologías diésel (Euro IV, V y VI), GNC, híbrida (Euro VI), eléctrica de baterías y eléctrica de carga de oportunidad (OppCharge). Se realizan simulaciones considerando escenarios con diversos precios (entre 5 y 50 dólares) por tonelada de carbono para evaluar los cambios en los costos anuales equivalentes de las diferentes alternativas de flotas de autobuses.