

---

# Opciones para Descontaminar Santiago:

## *El Gas Natural en el Transporte Público*

---

### Resumen<sup>\*</sup>

Felipe Larraín

Jorge Quiroz

*Este estudio contó con el financiamiento de Sofofa y MetroGas S.A. Las opiniones vertidas aquí son de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan las de Sofofa o MetroGas S.A.*

Se autoriza la reproducción citando la fuente.

---

<sup>\*</sup> Este es un resumen de un documento más amplio realizado por los mismos autores

---

## PRINCIPALES CONCLUSIONES

- ❑ El objetivo de este estudio fue analizar, usando toda la información disponible, la contribución que podría representar para el logro de las metas del PPDA (Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana), la reconversión del transporte colectivo desde DIESEL a GAS NATURAL COMPRIMIDO (GNC). Esta medida aparece consignada como una de las 104 contempladas en el PPDA.
  
- ❑ Las acciones que se han llevado a cabo en los últimos años, dentro de las que destacan la reducción de emisiones de fuentes fijas y la renovación del parque vehicular y su conversión a motores catalíticos, han tenido como resultado el que, por lo menos, la situación no haya empeorado, a pesar de un sostenido crecimiento de la población, actividad económica y transporte en la Región Metropolitana durante los '90. (Se estima que el parque vehicular a nivel nacional creció un 28% entre 1995 y 1999, siendo la Región Metropolitana el lugar donde circula el 50% de dicho parque).
  
- ❑ Hacia delante, sin embargo, y habiéndose ya logrado importantes reducciones en la emisión por parte de fuentes fijas, existe consenso en que se deberá atacar de modo más estructural y definitivo la contaminación originada en las fuentes móviles y, fundamentalmente, aquella que tiene por fuente el transporte colectivo.
  
- ❑ Se observa que sólo 15 de las 104 medidas propuestas podrían lograr más de un 70% del total de la efectividad estimada de las estrategias del PPDA en

cuanto a material particulado, más del 60% relativo a NO<sub>x</sub> y CO, más del 50% de COV y 100% de SO<sub>x</sub>.

- ❑ Basado en los resultados obtenidos, este estudio sostiene la tesis de que entre las 15 medidas más efectivas existen 4 que resaltan por su eficacia, eficiencia y rapidez y facilidad de implementación. Ellas son: modificación de la composición del petróleo diesel, pavimentación de calles, lavado de calles y conversión de los buses desde Diesel a Gas Natural Comprimido (GNC).

**Entre las cuatro medidas, destaca la conversión de buses desde Diesel a GNC por las siguientes razones:**

- ❑ Su **eficacia** está ampliamente respaldada tanto por la experiencia de Chile en el caso de las fuentes fijas como por la experiencia documentada en otros países del mundo. La conversión desde Diesel a GNC en los buses tendría importantes efectos en cuatro de los cinco contaminantes criterio<sup>1</sup>. De acuerdo a algunas opiniones un contaminante que también debiera ser considerado explícitamente es el PM<sub>2,5</sub> (no incorporado en las metas del PPDA). Si bien no existe pleno consenso en este punto, si se considerase como parte integral de las metas, se advierte que la conversión a GNC del transporte público también tendría importantes efectos sobre éste.

---

<sup>1</sup> La eficacia de los buses GNC se verifica aún cuando en el estudio se utiliza como punto de comparación una flota de buses diesel compuesta en un 100% por buses que cumplen la norma EPA 94. La situación anterior representa un escenario mucho más favorable para los buses diesel que la realidad actual de la flota. Específicamente, se supone que la flota diesel EPA 94 emite del orden de 355 ton/año de PM<sub>10</sub> mientras que el inventario de emisiones de 1997 señala que las emisiones de PM<sub>10</sub> asociadas a buses superan las 1.000 ton/año.

- ❑ La **eficiencia** de la medida queda de manifiesto cuando se compara con otras alternativas. Usando los datos disponibles del PPDA de 1997 se encuentra que la conversión de al menos 6.906 buses de Diesel a GNC forma parte del subconjunto óptimo de medidas que deberían ser implementadas. Este es un resultado bastante robusto a ejercicios de sensibilización. Asimismo, estimaciones complementarias indican que si el PM<sub>2,5</sub> fuese incluido explícitamente como objetivo del PPDA la importancia de esta medida crecería aún más.
  
- ❑ La **facilidad de implementación** de esta medida surge directamente del hecho de que el sector privado ya ha hecho la inversión en redes de distribución de Gas Natural, situación que permite una rápida aplicación de este cambio, con un costo absolutamente modesto para los usuarios. Nuestras estimaciones indican que la reconversión de buses a GNC se puede hacer sin impactar la rentabilidad del negocio de los transportistas, requiriéndose para ello un aumento máximo de sólo \$11 en el boleto para la financiación del cambio. Alternativamente, el cambio podría financiarse con un impuesto a los combustibles de consumo en la Región Metropolitana del orden de un 2% o menos. Ambas medidas tienen un impacto absolutamente despreciable en el IPC y la primera tendría un impacto también muy despreciable sobre los ingresos reales de los dos primeros deciles de ingreso de la población (del orden de 0,29%).
  
- ❑ La introducción de prioridades a las medidas del PPDA conduce indefectiblemente a incorporar la conversión del transporte público desde

Diesel a GNC como ingrediente fundamental del paquete de acciones que se adopte.

- ❑ Esto puede ser perfectamente financiado con impactos muy reducidos en el IPC, la tarifa del transporte, u otros impuestos a los combustibles. Se cuenta también con amplia experiencia internacional que asegura la efectividad de esta alternativa.

# 1. Antecedentes

La contaminación del aire en Santiago alcanza desde hace más de dos décadas niveles extremadamente elevados – dentro de los más altos del mundo -- que ponen en serio riesgo la salud de sus habitantes. Las normas ambientales de algunos “contaminantes criterio”<sup>2</sup> son superadas repetidas veces durante el invierno como es el caso del PM10 y el CO y también durante la primavera y el verano como es el caso del ozono.

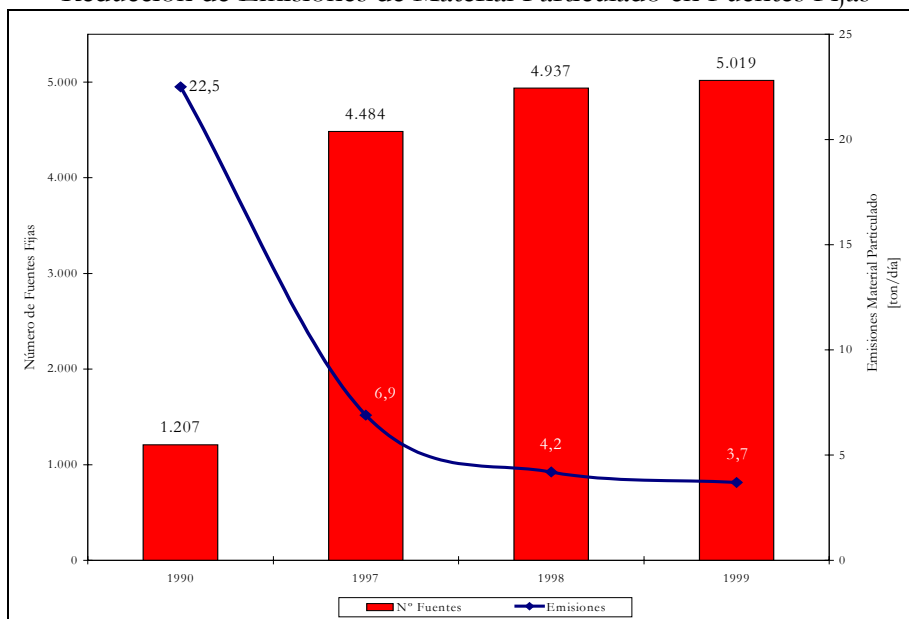
En base a lo anterior, el PPDA fijó un cronograma de reducción de emisiones. Dicho cronograma considera el período 1997-2011 y señala que *todas las actividades* deberán reducir sus emisiones, respecto de sus responsabilidades indicadas en el inventario para 1997, en el mismo porcentaje, que será equivalente al porcentaje de reducción global. El porcentaje de reducción global es de un 50% para el caso de PM10 y sus precursores, un 50% para los precursores del Ozono (Óxidos de Nitrógeno (NOx) y Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs)), un 60% para el caso del CO y un 50% para el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

Durante la década del ‘90, los esfuerzos realizados por las fuentes fijas a partir de 1992, la reconversión a gas natural en numerosas industrias a partir de 1997 y la reconversión a automóviles catalíticos, permitió que la contaminación del aire no creciera, a pesar de un sostenido aumento del tamaño de la ciudad (en términos de habitantes, parque vehicular y actividad económica en general). Sin embargo, a futuro y reducido ya el problema de la contaminación por fuentes fijas a niveles muy bajos (ver gráfico 1), queda pendiente el problema de las fuentes móviles en general y del transporte colectivo en particular. **Existe bastante consenso en que futuros progresos en la descontaminación del aire de Santiago dependerán crucialmente de la reducción que se logre en las emisiones derivadas del transporte.**

---

<sup>2</sup> Se denominan contaminantes criterio a aquellos contaminantes más comunes para los cuales se ha logrado medir su impacto en la salud humana. Entre estos se encuentran el material particulado (PM10), el Ozono (O<sub>3</sub>), el Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), el Monóxido de Carbono (CO) y los Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

Gráfico 1  
Reducción de Emisiones de Material Particulado en Fuentes Fijas



Fuente: SESMA

Nota: Si bien en 1990 el número de fuentes era superior a las 1.207 que se muestran en el gráfico, el registro de 22,5 ton/día corresponde a dicho número de fuentes las cuales estaban inscritas en esa fecha.

Del Gráfico 1 se puede concluir que la emisión de material particulado relacionado con fuentes fijas cayó desde 22,5 ton/día en 1990 hasta 3,7 ton/día en 1999. Se estima que a la llegada del gas natural, en el año 1997, las fuentes fijas emitían del orden de 7 ton/día. **Este espectacular proceso de reducción en las emisiones de las fuentes fijas constituye un ejemplo explicado por la conjunción de reglas claras por un lado (establecidas por el Decreto N°4 de 1992) y la disponibilidad de opciones tecnológicas (gas natural) por otro.**

Los avances alcanzados con las fuentes fijas han de fundamentar el consenso entre diversos especialistas en el sentido de que futuros progresos en la reducción de la contaminación requerirán de modo ineludible abordar la contaminación originada por las fuentes móviles y muy especialmente por el transporte colectivo.

Lamentablemente, hasta ahora y a pesar de los estudios y consensos, las perspectivas concretas de solución son negativas. En 1997 se aprobó el llamado “Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica” (PPDA) de la Región Metropolitana, que fijó metas de

reducción de la contaminación para los siguientes catorce años. El PPDA, si bien es rico y ambicioso en objetivos, resulta vago y general en los medios para lograrlos, proponiendo un conjunto de 104 medidas con escasa priorización. Observadores expertos han llamado la atención sobre la necesidad de focalizar los esfuerzos y concentrarse básicamente en el desafío de la contaminación originada en fuentes móviles y particularmente en el transporte público. **Estimaciones diversas sugieren que sólo 15 de las 104 medidas del PPDA concentran más del 70% del total de la efectividad estimada de las estrategias del PPDA en cuanto a material particulado; más del 60% relativo a NOx y CO; más del 50% de COV y el 100% de la efectividad para SOx.**

## 2. Asignación Óptima de Recursos

Ante la poca focalización del PPDA, la que se refleja también en ausencia de avances concretos, es claro que la autoridad debe buscar *un conjunto de medidas efectivas, eficientes y fáciles de implementar*. Efectivas, porque se debe estar seguro que su aplicación tendrá efectos importantes sobre el problema; eficientes porque los recursos económicos son escasos y todas las medidas conllevan un costo económico de cierta magnitud; fáciles de implementar, porque las barreras y costos de transacción que impone nuestro marco institucional y nuestra organización industrial muchas veces hacen poco viables medidas que aparentemente serían recomendables (por ejemplo, porque los costos de fiscalización podrían ser prohibitivos).

Una herramienta que sirve de apoyo para encontrar esas medidas efectivas y eficientes consiste en un modelo de optimización de recursos. Conceptualmente, dicho modelo escoge de un universo de posibles medidas a implementar, el subconjunto que logra las metas del PPDA al mínimo costo para la sociedad. Formalmente, el modelo de optimización se puede formular como sigue:

$$\text{Min}_{\lambda} \lambda^T C$$

sujeto a las siguientes restricciones:

$$A^T \lambda + \Delta Y^* \leq 0$$

$$\lambda \leq \bar{\lambda}$$

Donde  $C$  es el vector de costos que asocia a cada medida su costo económico de implementarse por completo,  $A$  es la matriz de efectividades que a cada medida le asigna su impacto sobre un vector de contaminantes,  $\Delta Y^*$  representa el vector objetivo de reducción en los niveles de emisión de contaminantes que se pretende alcanzar y  $\bar{\lambda}$  es el vector que indica el nivel máximo de aplicabilidad de cada norma (dado que cada medida se aplica a lo más una sola vez el valor de  $\bar{\lambda}$  es un vector  $(1, \dots, 1)^T$ ). Dado los objetivos  $\Delta Y^*$  y la efectividad definida por  $A$ , el modelo arroja el vector  $\lambda$  que asocia a cada medida del universo su grado de aplicación.

Para poder implementar el modelo anterior se requieren como input el costo y la efectividad de las medidas que se está considerando implementar. Por lo tanto, el principal input del modelo es la matriz costo efectividad asociada a dichas medidas.

**En el presente estudio se seleccionaron 9 de las 15 medidas más efectivas<sup>3</sup> mencionadas anteriormente, conjuntamente con la medida de conversión de buses diesel a gas natural (como una medida más a considerar en el universo de referencia).** El Cuadro 1 presenta una breve descripción de cada una de las medidas seleccionadas y el Cuadro 2 muestra la matriz costo-efectividad asociada a dichas medidas. Así por ejemplo, según se aprecia en el Cuadro 2, la pavimentación de calles tiene un costo de US\$ 85,7 millones y su efectividad consiste en una reducción de 3.944 ton/año en PM10.

---

<sup>3</sup> Se eliminaron 6 medidas por los siguientes motivos: el PPDA no reporta el costo de implementación (1), medidas correspondiente a fuentes fijas (3), costo reportado por PPDA está claramente subestimado (1) y medida equivalente a conversión de buses diesel a GNC (1).

Cuadro 1  
Explicación de las Medidas Seleccionadas del PPDA

Código Medida	Explicación de la Medida
<p><b>Transporte</b>            Conversión a GNC            Diesel            Gasolina cp            Gasolina sp            P. Combustible y Kerosene            Rev. Técnica Semestral</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consiste en reemplazar los buses licitados de la RM, que utilicen tecnología diesel y que tengan una antigüedad superior a 10 años por buses que utilicen gas natural.</li> <li>• Establece nuevo calendario de normas para el petróleo diesel grado A1. Esto se realiza en dos etapas: 1 de Abril de 2000 y 2002.</li> <li>• Establece los requisitos para la gasolina con plomo para motores de ignición por chispa, de expendio en RM. Impone limitaciones al contenido de aromáticos, benceno y plomo. Esto se realiza en tres etapas: A la aprobación del PPDA, 1 de Septiembre de 2000 y 2002.</li> <li>• Establece los requisitos para la gasolina sin plomo para motores de ignición por chispa, de expendio en RM. Incluye reducción del contenido de aromáticos y benceno. Esto se realiza en tres etapas: A la aprobación del PPDA, 1 de Septiembre de 2000 y 2002.</li> <li>• Establece nuevo calendario de normas para el Petróleo Diesel grado A2, PCN5, PCN6 y kerosene, de expendio en la RM.</li> <li>• Exigencia de revisión técnica cada 6 meses para vehículos anteriores a 1992 y camionetas, jeeps y furgones inscritos a nombre de personas jurídicas.</li> </ul>
<p><b>Polvo Resuspendido</b>            Pav. Calles y Pasajes            Lavado de Calles</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programa de pavimentación del déficit de 1.000 km de calles y pasajes sin asfaltar que aún existen en Santiago, durante los próximos 4 años (a contar del PPDA). Incluyendo pavimentación de bermas y paraderos regulados de buses en vías estructurales.</li> <li>• Programa de lavado de calles pavimentadas durante los meses de Abril a Septiembre de cada año, ambos incluidos. Adicionalmente, plan de limpieza del sistema de captación de aguas lluvia.</li> </ul>
<p><b>Industria Comercio y Construcción</b>            Cov. Terminal y Cov. Estación</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducir emisiones de gases de COV en los terminales de distribución y en los tanques de almacenamiento de los establecimientos de expendio de CL (estaciones de servicio) (fase 1) y desde los surtidores de combustibles en los establecimientos de expendio de CL (estaciones de servicio) (fase 2).</li> </ul>

Nota: PCN5 y PCN6 corresponden al Petróleo Combustible N°5 y N°6 respectivamente. La abreviación Cov. corresponde a Compuestos Orgánicos Volátiles.

Cuadro 2  
Resumen de Costo Efectividad de Medidas Seleccionadas

Medida	Valor Presente	Reducción Emisiones		
	MMUS\$	Contaminante	ton/año en Año 10	% PPDA
Conversión a GNC *	153,8	PM10	342	1,6%
		CO2	61.934	
		SOx	316	3,0%
		NOx	8.333	38,0%
		HCNM	388	
		CO	1.322	0,9%
Diesel	63,2	PM10	130	0,62%
		SOx	1.886	17,82%
Gasolina CP	52,6	PM10	117	0,56%
		SOx	17	0,16%
		COV	1.574	5,06%
Gasolina SP	52,6	CO	15.930	10,84%
		COV	392	1,26%
		NOx	318	1,45%
P. Combustibles y Kerosene	19,1	SOx	593	5,60%
P. Calles	85,7	PM10	3.944	18,88%
Lavado de Calles	5,1	PM10	3.928	18,80%
Cov Terminal	15,6	COV	3.450	11,09%
Cov Estación	21,5	COV	1.898	6,10%
Revisión Técnica semestral	31,5	CO	26.731	18,19%
		NOx	(633)	-2,89%
		COV	2.153	6,92%

Fuente: Elaboración propia.

\* En la evaluación de la conversión a GNC se consideró la transformación completa de la flota licitada diesel EPA 94 a GNC tanto en el cálculo del valor presente como de la reducción de emisiones.

El costo efectividad de las medidas presentes en el Cuadro 2 corresponde a valores reportados en el PPDA con excepción de la conversión de buses diesel a GNC que fue elaboración propia. Los supuestos bases de dicha estimación fueron:

El costo de la conversión a gas natural presentado en el Cuadro 2 se calcula en base al diferencial en inversión, a precios sociales, que enfrenta el empresario al realizar la conversión<sup>4</sup>. Dicho diferencial asciende a US\$ 32.645 por bus convertido. Suponiendo que el *timing* de conversión es el que se muestra en el Cuadro 3, el valor presente de la transformación, con una tasa de descuento de 12%, es de US\$ 153,8 millones.

<sup>4</sup> Por tratarse de una tecnología nueva existe incertidumbre respecto de los menores costos de operación que tendría un bus GNC respecto de un bus diesel. Por lo tanto, en la evaluación social sólo se considera el diferencial de inversión.

Cuadro 3  
Conversión de Buses

Buses/año	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Convertidos	410	743	1.234	1.075	1.799	447	448	615	925	285	240
Acumulados	410	1.153	2.387	3.462	5.261	5.708	6.156	6.771	7.696	7.981	8.221

Fuente: Elaboración propia en base a información del Registro Nacional de Servicios de Transporte de Pasajeros.

Nota: Se utiliza como base la flota de buses licitados de la RM. La conversión se produce en aquellos buses con antigüedad superior a 10 años.

La efectividad de la conversión a gas natural se calcula sobre la base de las emisiones de buses diesel y buses GNC registradas en el Plan Piloto de Utilización de Combustibles Gaseosos en Buses de la RM (ver Cuadro 4). Sin embargo, las reducciones que muestra el Cuadro 4 corresponden a una situación conservadora en cuantificar el impacto de la conversión a buses GNC desde buses diesel. Lo anterior debido a que en dicho cuadro se considera una situación en que todos los buses diesel cumplen con la norma EPA94. Sin embargo, dicha situación no corresponde a las características actuales del parque de buses licitados en la RM donde existe un número importante de buses que no satisfacen la norma EPA94 y que, por lo tanto, registran factores de emisión superiores a los utilizados en el Cuadro 4 (con lo que la conversión a GNC debiera tener aún más impacto). Específicamente, el inventario de emisiones de 1997 señala que los buses de la RM, en su totalidad, emiten más de 1.000 ton/año de PM10, más de 4.800 ton/año de CO y más de 1.000 ton/año de SO<sub>2</sub>. **En este sentido, la reducción de emisiones de PM10 asociada a la conversión de buses diesel a buses GNC sería de más de 1.000 ton/año y no sólo de 342 ton/año que es el resultado conservador obtenido al utilizar una flota de buses diesel EPA 94 como base de comparación.**

Cuadro 4  
Emisiones Totales para Buses Diesel y GNC EPA 94  
(ton/año)

	CO	HCNM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM10	CO <sub>2</sub>
Flota Diesel	1.388	598	9.642	316	355	1.064.126
Flota GNC	66	210	1.309	-	13	1.002.193
Reducción	1.322	388	8.333	316	342	61.934
% de Reducción	95%	65%	86%	100%	96%	6%

Fuente: Las emisiones se calculan en base a factores de emisión reportados en el "Estudio de Seguimiento Plan Piloto de Utilización de Combustibles Gaseosos en Buses de la RM" realizado por las Universidades de Chile y Católica en 1999. Se considera un recorrido por bus de 80.000 km. por año. Para ambas tecnologías se utilizaron mediciones realizadas en el MTC, en el caso particular del bus GNC se utilizaron las mediciones realizadas a un bus Scania de tecnología dedicada.

Nota: El cuadro muestra las emisiones de contaminantes suponiendo primero que toda la flota licitada de la RM es diesel y luego suponiendo que toda la flota es GNC.

El resultado que se obtiene del modelo es un vector  $\lambda$  que indica la fracción a aplicar de cada una de las medidas seleccionadas para conseguir la reducción planteada como restricción del modelo a un mínimo costo. La aplicación del modelo arroja el resultado:

$$\lambda = \begin{bmatrix} 0.842 & \text{GNC} \\ 0.977 & \text{Diesel} \\ 0.000 & \text{Gasolina cp} \\ 0.323 & \text{Gasolina sp} \\ 0.000 & \text{P. Comb. y K} \\ 0.508 & \text{Pav. Calles} \\ 1.000 & \text{Lav. Calles} \\ 1.000 & \text{COV. Term.} \\ 0.722 & \text{COV. Estación} \\ 1.000 & \text{Rev. Técnica} \end{bmatrix}$$

Como se puede apreciar, el modelo indica que, *la conversión de buses a GNC constituye un ingrediente clave en la estrategia de descontaminación de mínimo costo, requiriéndose que se implemente en un 84%*. En términos absolutos, el 84% de la medida equivale a que se conviertan **6.906 buses desde diesel a gas natural**.

También cabe notar que de implementarse esta medida habría un efecto inducido adicional, cual es la conversión de los taxis. Lo anterior, debido a que a dichos vehículos, como ha sucedido en Punta Arenas, teniendo acceso a una red de abastecimiento de GNC les es rentable cambiarse en términos privados.

Finalmente, el análisis anterior no considera la importancia del gas natural en la reducción de la concentración de PM2,5. Dicho contaminante corresponde a la fracción fina del material particulado y según la opinión de expertos tendría un impacto directo en el sistema respiratorio

de las personas que se encuentran expuestas a él. **Respecto del PM2,5 el estudio indica, en base a estimaciones aproximadas<sup>5</sup>, que la conversión a GNC presenta un costo-efectividad superior a prácticamente todas las medidas seleccionadas (superado sólo por el lavado de calles cuyo costo-efectividad es de US\$ 22 millones por ug/m3) en lo que se refiere a reducción de concentración de PM2,5.** En particular, el costo-efectividad de reducir la concentración de PM2,5 asociada a la conversión de GNC es de US\$ 54 millones por ug/m3 número que se compara con un costo-efectividad de US\$ 72 millones por ug/m3 reducido en el caso del cambio de composición del petróleo diesel.

**Por último, cabe señalar que además del GNC, el modelo indica que medidas como la modificación de la composición del petróleo diesel, la pavimentación de calles y pasajes, el lavado de calles, la captura-tratamiento de COVs y la revisión técnica semestral también están presentes en una fracción importante en el subconjunto óptimo de medidas a considerar.**

### **3. Implementando el Cambio: Propositiones de Política.**

**Conceptualmente, lo que el modelo de optimización nos dice es que si el objetivo es acercarse a las metas actuales del PPDA al *menor costo posible para la sociedad*, entonces, la conversión del transporte público a GNC *debe implementarse en un 84%***

---

<sup>5</sup> El estudio señala que existe un fuerte debate respecto de la norma del PM2,5. Por una parte, la CONAMA estima que este contaminante debería normarse, y por tanto incluirse explícitamente en las metas del PPDA. Por otra parte, la Sofofa y el Instituto Libertad y Desarrollo estiman que no debería ser normado, pues arguyen que no se conoce internacionalmente cuál es el umbral aceptable de PM 2.5 y que la propia Organización Mundial de la Salud (OMS) no lo recomienda. Finalmente, el objetivo de incluir dicho contaminante en el análisis no es terciar en esta polémica. Más bien, es efectuar una estimación preliminar de cuál es el efecto de las distintas medidas evaluadas en la formación de PM 2,5. Dada la característica preliminar de esta estimación, sin embargo, los resultados de deben considerarse como tentativos.

*o equivalentemente en 6.906 buses (en conjunto con otras medidas).* El Cuadro 5 muestra los costos privados y sociales de transformar el 84% de la flota.

Cuadro 5  
Costo Privado y Social de Transformación del 84% de la Flota de Buses  
Incluidos Costos de Operación  
(cifras en US\$)

Escenario Petróleo	Privado			Social		
	16 US\$/Bbl	20 US\$/Bbl	25 US\$/Bbl	16 US\$/Bbl	20 US\$/Bbl	25 US\$/Bbl
Diferencial Inversión	135.463.926	135.463.926	135.463.926	129.225.769	129.225.769	129.225.769
Diferencial Operación	-28.836.763	-37.978.508	-49.405.682	27.224.392	18.454.917	7.493.196
<b>Total</b>	<b>106.627.162</b>	<b>97.485.418</b>	<b>86.058.243</b>	<b>156.450.161</b>	<b>147.680.686</b>	<b>136.718.966</b>

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las cifras corresponden al valor presente a tasas de 15% y 12% para el caso privado y social respectivamente.

El diferencial de costos de inversión y operación es entre buses GNC y buses diesel. Por lo tanto, las cifras negativas indican un ahorro a favor de los buses GNC.

Como se puede apreciar en el Cuadro 5, el costo de transformación se puede descomponer en dos costos: costo de inversión y costo de operación. El costo de inversión corresponde al valor presente del costo de transformación considerando solamente el diferencial de inversión entre un bus GNC y un bus diesel. El costo de operación corresponde al valor presente del diferencial de costo de operación entre un bus GNC y un bus diesel. Así por ejemplo, para el caso del costo privado en un escenario de precio internacional del petróleo Brent de US\$20 por barril, el costo de transformación asciende a US\$97,5 millones compuestos por un costo de US\$135, 5 millones asociado al diferencial de inversión y un ahorro de US\$28,8 millones asociado a la operación del bus GNC respecto del bus diesel.

**Lo que no nos dice el modelo, sin embargo, es quién solventa los costos de dicha conversión. Aquí discutimos dos alternativas posibles. En ambos casos se supone que el cambio de diesel a GNC en los buses es obligatorio y se implementa en once años. Las opciones consisten entonces en dos formas alternativas de compensar a los empresarios de transporte por el mayor costo que presenta para ellos el bus GNC relativo al bus diesel.** En ambos casos se supone que el diferencial en los costos (privados) de operación entre diesel y GNC *percibido* por los empresarios del transporte colectivo se ignora y sólo importa el diferencial de la inversión inicial entre un bus GNC nuevo y un bus diesel nuevo. Esto, debido a que por tratarse de un sistema menos conocido, los ahorros de los

costos de operación del GNC pueden ser percibidos con un alto grado de incertidumbre por parte de los empresarios del transporte. Sin embargo, dado que el supuesto anterior supone un grado de miopía, también se evalúa la situación bajo expectativas racionales, en que los agentes (microbuseros) perciben los verdaderos diferenciales de costos de operación. Dichos diferenciales de operación, a precios privados, se basan principalmente en el menor precio del gas natural comprimido respecto del petróleo diesel. El Cuadro 6 muestra el precio social y privado del gas natural comprimido así como del petróleo diesel para tres escenarios de precio internacional del petróleo Brent.

Cuadro 6  
Diferencial de Precio entre GNC y Diesel

Escenario de Precios	Diesel (1) (\$/litro)	GNC (2) (\$/m3)	GNC Corregido (3)=(2)/0,82 (\$/m3)	Diferencial GNC-Diesel (3)-(1) (\$/m3)
16 US\$/Bbl				
Precio Social	110	96	117	7
Precio Privado	178	117	143	-35
20 US\$/Bbl				
Precio Social	123	104	127	4
Precio Privado	196	127	155	-41
25 US\$/Bbl				
Precio Social	141	114	139	-2
Precio Privado	218	140	171	-47

Fuente: Elaboración propia.

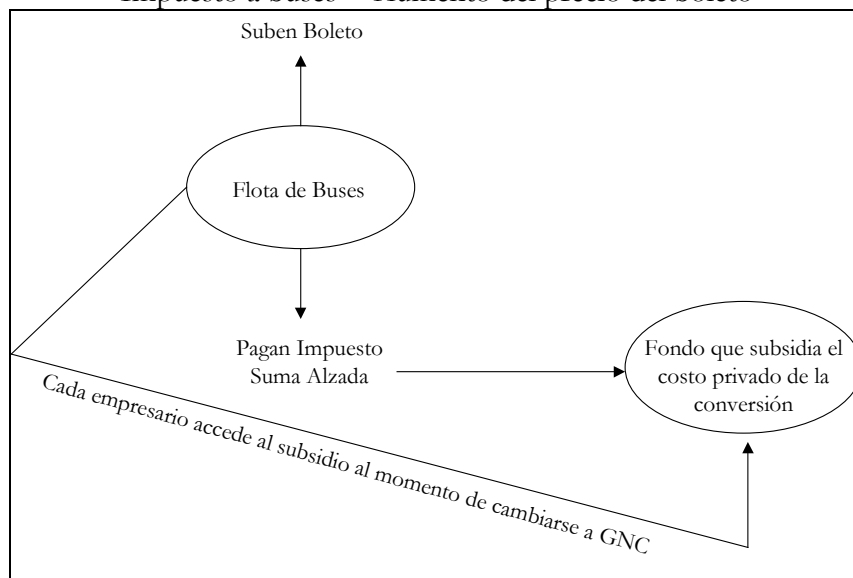
Nota: El precio corregido del GNC se divide por 0,82 que es el equivalente de la relación de rendimientos entre el bus a gas natural y el bus diesel, es decir, 1,43 (km./litro) sobre 1,75 (km./litro)

Para financiar la conversión se consideran las siguientes dos opciones:

- a) Existe un calendario fijo y determinado a 11 años para cambiarse a tecnologías que al menos cumplan los estándares de emisión asociados al GNC. El Estado subsidia directamente la diferencia de costo de inversión del GNC a los empresarios del transporte en el momento en que estos deben cambiar sus máquinas. El Estado obtiene estos recursos a través de un impuesto de suma alzada a toda la flota de buses. Por su parte, los empresarios pueden pagar el impuesto porque se permite un alza en el precio del boleto (todos los buses suben) que recauda una suma equivalente. El alza de precio es *pareja* (idéntica para buses a GNC y buses no convertidos). En este caso, él que paga

el cambio en definitiva es el usuario del transporte. El esquema se presenta en el Diagrama 1.

Diagrama 1  
Esquema de Funcionamiento de Alternativa:  
Impuesto a buses + Aumento del precio del boleto



- b) Existe un calendario fijo y determinado a 11 años para cambiarse a tecnologías que al menos cumplan los estándares de emisión asociados al GNC. El Estado subsidia directamente el diferencial de costo de inversión del GNC a los empresarios del transporte en el momento en que les toque cambiar de máquina. El Estado obtiene estos recursos a través de un impuesto a los derivados de los combustibles que se consumen en la RM (petróleo diesel, gasolina automotriz, petróleos combustibles, kerosene, gas licuado, gas natural y gas de ciudad). En este caso la conversión se financia por todos los usuarios de dichos combustibles.

El Cuadro 7 muestra el costo privado de la conversión para cada escenario del precio internacional del petróleo y los resultados asociados a cada alternativa de financiamiento. Por su parte, el Cuadro 8 muestra los impactos del alza en el precio del boleto, tanto en el IPC como en el ingreso de los quintiles más pobres, y el Cuadro 9 muestra en impacto del impuesto en el precio de los combustibles.

Cuadro 7  
Costo Privado de Transformación a Gas Natural  
Caso que Incorpora Costos de Operación

Escenario Precio del Petróleo US\$/Bbl	Costos Privado de Conversión MMUS\$	Alternativa 1 Alza Boleto+Impuesto Buses		Alternativa 2 Impuesto a Combustibles
		ΔPrecio Boleto \$	Impuesto Bus US\$/año	US\$/teracaloría
No incluida operación	135	11	3.065	369
16	107	9	2.445	298
20	97	8	2.174	272
25	86	7	1.902	240

Fuente: Elaboración Propia

Nota: El alza del boleto se aproxima al entero más cercano. Sin embargo, el impuesto anual corresponde al valor exacto del aumento en el precio del pasaje. Por ejemplo, en el caso de un costo de conversión de US\$ 107 millones el aumento del pasaje debiera ser de \$ 8,9 lo cual se aproxima a \$ 9. Sin embargo, el impuesto anual a los buses de US\$ 2.445 es el correspondiente a los \$ 8,9.

Cuadro 8  
Impacto del Alza en el Precio del Boleto  
en IPC e Ingreso de Quintiles más Pobres

Escenario Precio del Petróleo US\$/Bbl	ΔPrecio Boleto \$	Impacto en Ingreso %	Impacto en IPC %
No incluida Operación	11	0,294	0,171
16	9	0,240	0,140
20	8	0,214	0,124
25	7	0,187	0,109

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en los cuadros, la conversión significaría como máximo un alza de \$ 11 bajo la primera alternativa (pudiendo ser \$7) o un impacto entre \$ 1 y \$ 2 por litro, kg o m<sup>3</sup> de combustible vendido en la RM. El impacto en el IPC es de menos de 0,2% en el primer caso.

**Cuadro 9**  
**Impacto del Impuesto a Combustibles de Consumo en RM**  
**Considerando los Costos de Operación**

Combustible	Precio*	Impuesto	Impacto del Impuesto so Precio %	Recaudación US\$
	(1)	(2)	(2)/(1)*100	(3)
<i>No incluida operación</i>				
Diesel (\$/litro)	179	1,8	1,00	62.021.592
Petróleo Combustible (\$/litro)	91	1,9	2,12	13.806.799
Gasolina automotriz (\$/litro)	296	1,6	0,54	47.059.331
Kerosene doméstico (\$/litro)	157	1,8	1,12	7.928.319
Gas licuado de petróleo (\$/kg)	359	1,3	0,36	23.553.703
Gas Natural (\$/m3)	121	1,8	1,51	32.115.945
Gas de Ciudad (\$/m3)	183	0,9	0,49	2.452.241
<b>Total</b>				<b>188.937.930</b>
<i>Escenario US\$ 16 por Bbl</i>				
Diesel (\$/litro)	161	1,4	0,87	48.818.801
Petróleo Combustible (\$/litro)	80	1,5	1,90	10.867.689
Gasolina automotriz (\$/litro)	277	1,3	0,45	37.041.617
Kerosene doméstico (\$/litro)	139	1,4	1,00	6.240.585
Gas licuado de petróleo (\$/kg)	335	1,0	0,31	18.539.729
Gas Natural (\$/m3)	108	1,4	1,32	25.279.292
Gas de Ciudad (\$/m3)	170	0,7	0,42	1.930.222
<b>Total</b>				<b>148.717.935</b>
<i>Escenario US\$ 20 por Bbl</i>				
Diesel (\$/litro)	179	1,3	0,72	44.633.291
Petróleo Combustible (\$/litro)	91	1,4	1,53	9.935.941
Gasolina automotriz (\$/litro)	296	1,2	0,39	33.865.832
Kerosene doméstico (\$/litro)	157	1,3	0,81	5.705.545
Gas licuado de petróleo (\$/kg)	359	0,9	0,26	16.950.214
Gas Natural (\$/m3)	121	1,3	1,08	23.111.956
Gas de Ciudad (\$/m3)	183	0,6	0,35	1.764.734
<b>Total</b>				<b>135.967.513</b>
<i>Escenario US\$ 25 por Bbl</i>				
Diesel (\$/litro)	201	1,2	0,58	39.401.407
Petróleo Combustible (\$/litro)	105	1,3	1,20	8.771.257
Gasolina automotriz (\$/litro)	319	1,0	0,33	29.896.102
Kerosene doméstico (\$/litro)	180	1,1	0,63	5.036.745
Gas licuado de petróleo (\$/kg)	389	0,8	0,22	14.963.321
Gas Natural (\$/m3)	137	1,2	0,87	20.402.788
Gas de Ciudad (\$/m3)	198	0,6	0,30	1.557.873
<b>Total</b>				<b>120.029.493</b>

Fuente: Elaboración propia.

Nota: (1) Los precios utilizados corresponden a estimaciones propias. En el caso del petróleo diesel se utilizó un precio ponderado, según consumo nacional, entre diesel de consumo industrial y comercial, público y residencial, y el diesel de consumo en transporte (32% y 68% respectivamente). En el caso del petróleo combustible se utilizó como referencia el precio estimado para el fuel oil n°6 LEF. El precio de la gasolina automotriz corresponde al promedio ponderado entre gasolina 93 y gasolina 97.

(2) El impuesto para el diesel, el petróleo combustible, la gasolina automotriz y el kerosene se expresa en \$/litro, por su parte, el impuesto para el gas licuado de petróleo se expresa en \$/kg, y finalmente el impuesto para el gas natural y el gas de ciudad se expresa en \$/m3.

(3) Corresponde al valor presente de la recaudación, tasa 7%, durante los próximos 11 años con un crecimiento estimado del consumo de 5% anual.

(\*) En el caso en que no se incluye la reducción de costos asociada a la operación de los buses GNC se utilizan los precios del escenario medio con el fin de medir el impacto del impuesto.