

# PENETRACIÓN DEL GAS EN EL SECTOR TRANSPORTE TERRESTRE EN COLOMBIA

---

Ricardo Smith<sup>1</sup>

Isaac Dynner<sup>2</sup>

Santiago Arango<sup>3</sup>

*Posgrado en Aprovechamiento de Recursos  
Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Medellín. A. A 1027*

Yris Olaya<sup>4</sup>

*Posgrado en Sistemas, Universidad Nacional de  
Colombia, Sede Medellín. A. A 1027*

## Resumen

Este artículo es el resultado de una investigación realizada sobre las alternativas energéticas en el sector transporte terrestre en Colombia. Se desarrolló un modelo en Dinámica de Sistemas que permite simular el comportamiento de la dinámica energética en ese sector dadas unas políticas propuestas. Se analizaron políticas de sustitución y de combustibles para el parque automotor, además de algunas consideraciones ambientales. Se muestran algunos resultados y análisis de las

políticas simuladas y finalmente se presentan algunas conclusiones recomendaciones.

## Abstract

This paper reports research on energy use in the ground transport sector in Colombia. A System Dynamics Model was developed to simulate the behavior of the transportation sector energy dynamics under some proposed policies. Substitution policies, optimization of vehicles were considered as well as environment impact. Some results and analysis of the simulated policies are shown, and some conclusions and recommendations are finally presented.

## 1. Introducción

Las debilidades de los países en desarrollo en cuanto a las apropiaciones tecnológicas, llevan consigo problemas como el uso ineficiente de la energía. Estos países están caracterizados por un crecimiento poblacional acelerado, a lo cual conlleva crecientes necesidades de movilización, lo que implica un aumento en el consumo de los energéticos en el sector transporte terrestre, en particular el consumo de gasolina motor.

En Colombia es necesario importar gasolina motor debido al déficit existente en refinación, lo cual representa altos costos, ya que hay que comprar gasolina al precio del mercado internacional. Además, Colombia posee alta dependencia a este energético que se refleja en la pobre canasta energética. En la Tabla 1 se puede observar la distribución del consumo de combustibles para el

---

<sup>1</sup> Email: rasmith@perseus.unalmed.edu.co

<sup>2</sup> Email: idiner@perseus.unalmed.edu.co

<sup>3</sup> Email: sarango@andromeda.unalmed.edu.co

<sup>4</sup> Email: yolaya@andromeda.unalmed.edu.co

sector transporte terrestre (PEN, 1997). El uso de la gasolina tiene consecuencias ambientales negativas, ya que contribuye al calentamiento global, a

aumentar el efectos de invernadero y al aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, entre otras, situación que

**Tabla 1 Energéticos en el sector transporte en Colombia (PEN, 1997)**

Combustible	Porcentaje del consumo de energía – 1996
Gasolina Motor	71%
Diesel	19%
Kero-jet	9%
Gas Natural	1%
Otros	1%

pudiese mejorarse con el uso de energéticos alternativos.

La puesta en marcha del plan de masificación del consumo del gas natural ha abierto la posibilidad de la sustitución de gasolina y ACPM por gas natural en los grandes centros consumidores, de manera que pueda diversificarse la oferta energética y mejorar algunos aspectos tanto de eficiencia como ambientales.

La penetración del gas en el sector transporte terrestre es incentivada, entre otros, por factores como la disponibilidad y accesibilidad a la tecnología de los vehículos a gas, la utilización de la infraestructura creada para el plan de masificación del gas natural, la posibilidad de obtener un alto beneficio ambiental, la disponibilidad de las reservas de gas existentes en el país, entre otros.

En este estudio se desarrolló una plataforma en Dinámica de Sistemas para el apoyo de políticas energéticas, en el cual se modela la dinámica del sector transporte terrestre, se hace un análisis de políticas y una evaluación de los efectos ambientales, permitiendo la posibilidad de sustitución de la gasolina por gas natural.

El modelo se desarrolló basado en la información conseguida y con un entendimiento del sistema desde un punto de vista dinámico, involucrando algunos aspectos socioeconómicos y técnicos. El modelo permite analizar y evaluar escenarios de

sustitución de combustibles en el sector transporte terrestre a través del modelo “LOGIT” y basado en el costo anual equivalente de los vehículos.

Para validar el modelo se han comparado los resultados de este con resultados de otros estudios, y se hace adicionalmente un análisis de sensibilidad para aquellas variables en las que se tuvo dificultad en su estimación y para aquellas que se tiene incertidumbre sobre su comportamiento. Además se presentan algunos resultados y el análisis de diferentes escenarios y políticas propuestas para el sector transporte terrestre, así como algunos efectos ambientales.

## 2. Análisis de información

Para el desarrollo del modelo se presentó dificultad en la recolección de información. Se encontró que el país tiene muchas deficiencias en cuanto a la recolección, clasificación y manejo integrado de la información en el sector transporte. Se observó es la falta de registros de vehículos nuevos en el parque automotor, las salidas del parque y estimación de vidas útiles, entre otros.

Uno de los principales estudios que sirvió de base para la presente investigación fue “Ajuste de Modelos de Proyección de la Demanda Energética del Sector Transporte” (Chahín, 1993), cuyo objetivo primordial era la realización de ajustes de los modelos desarrollados por el Ministerio de Minas y Energía en 1988, y además de la

determinación del comportamiento de la demanda de energéticos en el sector transporte. El estudio se basó en información de instituciones como el INTRA, MOPT, DANE, ACOFA, OEA y del Ministerio de Minas y Energía. Otro estudio considerado fue el hecho por la UPME (1997) "Mercado de Combustibles en el Transporte Automotor de Colombia: Determinación y Seguimiento", en el cual se pretende superar la limitación de información que se presenta en el sector transporte, abandonando el enfoque metodológico convencional de parque-recorrido-rendimientos para observar la demanda a través del seguimiento de los flujos de oferta de combustibles. También se utilizó información del "Estudio Nacional de Energía, ENE", realizado por el Ministerio de Minas y Energía y el Departamento Nacional de Planeación en 1982; el proyecto: "Consumo, Sustitución y Conservación de Energía en el Sector Transporte" realizado en conjunto por la OEA y el Departamento de Desarrollo Regional de Bogotá en 1986; y del documento "Balances Energéticos Consolidados de Colombia 1975 - 1996" presentado la UIME (Unidad de Información Minero Energética) del Ministerio de Minas y Energía, entre otros.

Los principales problemas de la información recolectada son, entre otros, las diversas formas de desagregación del parque automotor, mucha información faltante. Es importante anotar que todos los estudios están soportados en información muy antigua que posiblemente difiera significativamente con la situación actual del parque automotor y del consumo energético.

## **2.1 Modelo de demanda en dinámica de sistemas**

### *Dinámica del Sector Transporte Terrestre*

El sector transporte terrestre presenta el mayor consumo de energía en el país, siendo el único sector que no es autosuficiente con respecto a la oferta energética, y tiene necesidades crecientes de importación de gasolina motor para satisfacer su demanda del energético. Es entonces importante observar el comportamiento de la demanda del

combustible, su evolución y la posible penetración de combustibles alternativos como el gas natural.

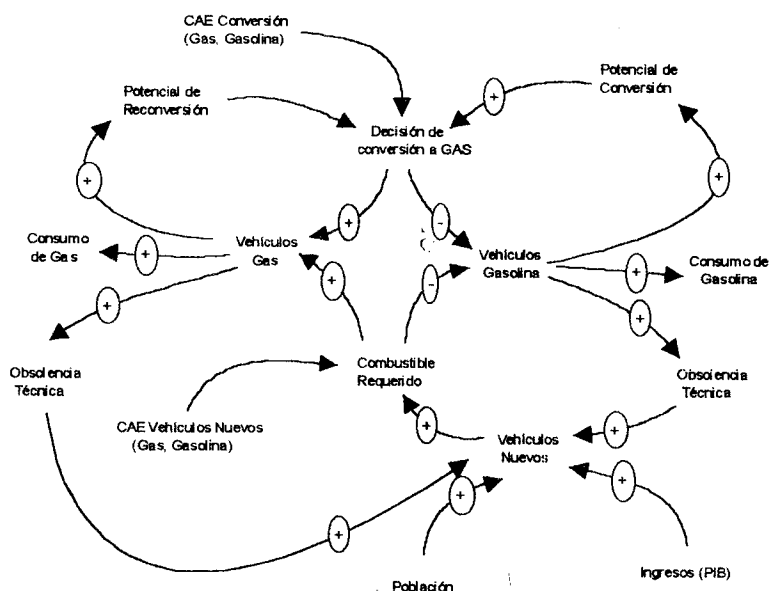
La dinámica del consumo de gasolina y gas, es decir, la demanda de combustibles en el sector transporte terrestre, y la estructura de conversión de vehículos de gasolina a gas, se aprecia en términos generales en la Figura 1. Colombia presenta continuos crecimientos de su población, así como de su producción y con esta dinámica se da un cambio en la necesidad de movilización de productos y personas, es decir, se incrementan los requerimientos (demanda) por vehículos nuevos. Al existir más vehículos nuevos, aumenta el consumo del combustible requerido. De acuerdo con la decisión del combustible requerido, se incrementan tanto los vehículos a gasolina como a gas. La decisión del combustible requerido se basa en un indicador para vehículos nuevos, tanto a gasolina como a gas, tratando de escoger la alternativa más económica. El modelo consideró el Costo Anual Equivalente (CAE) como indicador económico para la comparación de alternativas. Los vehículos a gasolina y a gas, al ir llegando al final de la vida útil, presentan obsolescencia técnica, lo cual implica que no es posible seguir operándolos. Esto representa un incremento en vehículos nuevos requeridos.

Los vehículos a gasolina tienen el potencial de conversión a gas. La decisión de conversión es mayor en la medida en que el potencial de conversión es mayor y que su costo de operación sea inferior. Pero los vehículos ya convertidos a gas tienen la posibilidad de reconvertirse al uso de la gasolina, es decir, pueden usar de nuevo gasolina por motivos tales como falta de oferta de gas, ineficiencia de los motores, falta de garantías y regulaciones u otros. Al existir un mayor potencial de reconversión a gasolina, disminuye la decisión de conversión a gas. Para tomar la decisión de conversión a gas, es necesario tener en cuenta, además del potencial de conversión o reconversión a gasolina, el CAE de conversión, tanto de vehículos a gasolina como a gas. Si se toma la decisión de conversión, se presenta un incremento de los vehículos a gas y el correspondiente aumento en su consumo. Asimismo, al tomar la decisión de

conversión a gas, disminuye el número de vehículos a gasolina y por lo tanto, el consumo de gasolina

Para mayor detalle, se presenta la figura 2. En esta se muestra como la evolución del parque automotor depende del comportamiento de variables como el

PIB y la Población, a través del comportamiento de las adiciones al parque automotor. Es necesario analizar el comportamiento en el tiempo de estas



**Figura 1 Dinámica de la demanda de gasolina y gas, sector transporte terrestre**

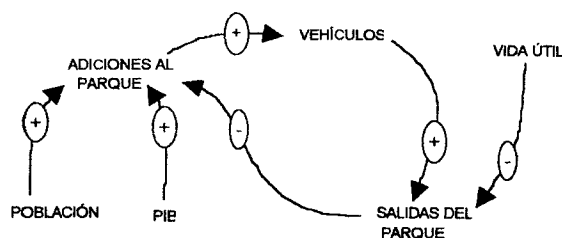
variables y las proyecciones esperadas por el gobierno, como se muestra más adelante.

El número de vehículos en un momento dado depende de variables exógenas al sistema, tales como la producción nacional representada en el PIB (Producto Interno Bruto) y la población, de manera que a medida que crece la población y el PIB, aumentan las adiciones de vehículos al parque, y por lo tanto aumenta el tamaño del parque automotor; y a mayor número de vehículos mayor es el número de salidas del parque automotor. Al presentarse más salidas del parque, se sustituyen los vehículos con nuevas adiciones. Para determinar las salidas del parque automotor, se tiene como base su vida útil promedio.

El crecimiento del parque automotor, y por lo tanto de la demanda de combustible obtenido con el modelo, es dinámico y tiene en cuenta las interrelaciones existentes entre las componentes del

sistema, abandonando el enfoque tradicional de los modelos econométricos.

En el modelo es posible obtener el parque automotor de dos formas. La primera de ellas es con las proyecciones del parque total en términos del PIB



**Figura 2 Evolución del parque automotor**

per Cápita y la población, y que representa un modelo econométrico que no permite involucrar políticas. La segunda forma es a partir de las adiciones y las salidas del parque automotor, y que dependen de variables exógenas al sistema como

los son el PIB per Cápita, la población, la vida útil de los vehículos y una constante retroalimentación en el sistema. Con este modelo se podrían plantear algunas políticas como acelerar o desacelerar las salidas del parque automotor disminuyendo o aumentando la vida útil de los vehículos. Las dos metodologías descritas de estimación del parque permite la validación del modelo comparando los resultados obtenidos con los reportados en diversas fuentes de información.

#### Modelo de Consumo de Energéticos

Una vez conocida la dinámica del parque automotor, se puede estimar el consumo de combustible haciendo uso del modelo tradicional de coeficientes técnicos, el cual consiste en determinar esos consumos basado en el tamaño del parque automotor y en coeficientes que lleven a este resultado:

La estimación del consumo de gasolina, se evalúa para cada tipo de vehículo de la siguiente manera:

$$CG_i = RP_i \times CE_i \times VGL_i \times (1 - PD)$$

En donde  $i$  representa el tipo de Vehículo (Autos, Camperos, Pick-Ups, Buses y Camiones),  $CG_i$  es el consumo de gasolina del vehículo tipo  $i$ ,  $RP_i$  es el recorrido promedio anual del vehículo tipo  $i$ ,  $CE_i$  es el consumo específico del vehículo tipo  $i$ ,  $VGL_i$  son los vehículos a gasolina tipo  $i$ , y  $PD_i$  es el porcentaje del parque dieselizado de vehículos tipo  $i$ .

La información asociada para esta estimación se muestra en la tabla 2, a continuación.

**Tabla 2 Coeficientes técnicos para estimar el consumo de gasolina**

Tipo Vehículo	CE (gal/km) <sup>1</sup>	RP (km) <sup>2</sup>	PD (%) <sup>3</sup>
<b>Autos</b>	0.040	19325	1.3
<b>Camperos</b>	0.050	8475	1.3
<b>Pick-Ups</b>	0.050	18459	1.3
<b>Buses</b>	0.129	89382	10
<b>Camiones</b>	0.143	61500	60

1. Tomados del cuadro 21, OEA, Depto. de Desarrollo Regional, Bogotá, 1986. Para BUSES, Colciencias, FONADE OEA, 1990.
2. Tomados del cuadro 20, OEA, Departamento de Desarrollo Regional, Bogotá, 1986.
3. Estimaciones de la Tabla 4. Ref 5. UPME, 1997.

La metodología empleada para la estimación del consumo de combustibles, presenta inconvenientes con los coeficientes empleados, por lo tanto es recomendable reevaluarlos constantemente y continuar buscando otras metodologías como la propuesta por la UPME (SE-006, 1997). Para estimar el consumo de gas natural se utiliza el mismo modelo y se hace la conversión por el factor correspondiente de equivalencia energética.

#### Modelo de Sustitución

El modelo propuesto, pretende ser una herramienta que permita evaluar algunas políticas para el uso

racional de la energía en el sector transporte. Una de las políticas sugeridas es la penetración del gas natural en ese sector. La penetración de estos nuevos energéticos se puede dar por dos caminos: el primero de ellos es a través de la conversión de los vehículos de gasolina a gas natural, y el segundo es por medio de los nuevos vehículos que entran a circular directamente con el nuevo energético.

La elección del tipo de vehículo depende básicamente de dos aspectos: de la disponibilidad o vehículos potencialmente convertibles y del CAE (Costo Anual Equivalente). El mecanismo por el cual se da la conversión en el modelo es a través del algoritmo del "CONSUMER CHOICE"

(Escogencia del Consumidor), o conocido también como modelo Logit (Dyner, Franco y Peña, 1995).

El modelo Logit, da como resultado la elección entre varios productos dependiendo de un parámetro "gama", e indicaría en este caso el porcentaje elegido para cada tipo de vehículo. El parámetro "gama" muestra que tan fuerte es la propensión para la elección del tipo de combustible, dependiendo del costo relativo (CAE) del uso de otros combustibles.

En el modelo se tienen dos productos inicialmente: vehículos a gasolina y vehículos a gas para cada categoría (autos, camperos, pick-ups, buses y camiones), los cuales tienen costos anuales equivalentes bien sea de conversión (CAEc) o para vehículos nuevos (CAEn). El porcentaje de vehículos convertidos a gas del parque automotor existente de tipo  $i$ ,  $VC\_GAS_i$ , se calcula de la siguiente manera:

$$VC\_GAS_i = \frac{CAEc_i^{-Gama}}{\sum_j CAEc_j^{-Gama}}$$

De manera similar se halla el porcentaje de vehículos nuevos de tipo  $i$  que escogen el uso de gas como combustible, así:

$$VC\_GAS_i = \frac{CAEn_i^{-Gama}}{\sum_j CAEn_j^{-Gama}}$$

Estos porcentajes del parque automotor a gas, independiente de si es nuevo o convertido, se multiplican por un factor que representa la difusión que se ha hecho acerca del plan, es decir, es un factor de conocimiento de la implementación de la nueva tecnología. Es posible analizar diferentes políticas a través de este factor, observando que pasa si se hace conocer más o menos la alternativa del gas natural como combustible vehicular.

El CAE de los vehículos nuevos tiene en cuenta el costo diferencial entre el vehículo a gasolina y el vehículo a gas diferido a tres años y el costo anual del combustible utilizado, bien sea gas o gasolina. Para los vehículos a convertirse, el CAE se estima con el costo del consumo anual de combustible y el costo de conversión diferido en cuotas a tres años.

#### 4. Validación y análisis de sensibilidad

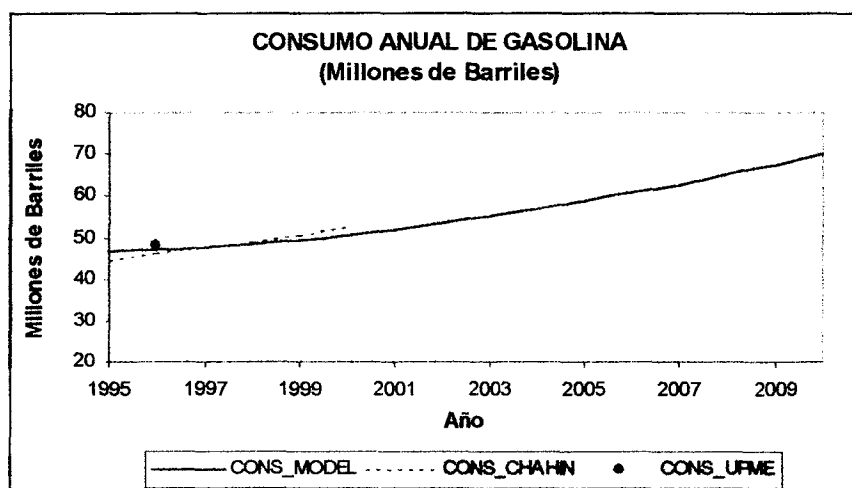
El modelo desarrollado debe ser consistente con las estimaciones y mediciones del consumo de gasolina que se hallan realizado para Colombia, para que tenga validez su utilización. Los estudios e información más representativa que se tienen, son el estudio de Chahín (1993), y el de la UPME (1997), pero ambos presentan una desagregación diferente en cuanto a la clasificación por tipo de vehículo. La información total agregada de estos dos estudios se pueden observar en la Figura 3, comparada con los resultados de una corrida del modelo desde 1995 hasta el año 2010.

En la Figura 3 se puede apreciar cómo los resultados del modelo coinciden con los de las otras dos metodologías, y además presenta una tendencia de crecimiento similar a la serie de Chahín (1993). A pesar de que el último estudio de la UPME (1997) posee solo un dato (consumo de gasolina para 1996), resultado de una encuesta, este dato es similar al consumo obtenido con el modelo. Los valores de consumo de gasolina son bien similares teniendo diferencias relativas menores de 4%, y para el año de 1996 se observa un error inferior al 2% con la serie de Chahín (1993). El error relativo de este modelo respecto al último estudio de la UPME (1997) es de solo el 2.1%. En conclusión, el modelo desarrollado presenta valores acordes con los estudios más representativos en el sector transporte terrestre.

Se hizo análisis de sensibilidad en algunos de los parámetros más importantes del modelo. Los parámetros que se analizaron fueron el factor Gama (propensión del consumidor para la elección del tipo de combustible), al crecimiento del PIB, ya que existen varios escenarios de crecimiento (PEN, 1997) y a la vida útil de los vehículos. No se presentaron problemas de sensibilidad con ninguno de estos parámetros y no mostraba cambios significativos en los resultados al hacerle variaciones razonables.

#### 5. Analisis y evaluación de políticas

Algunas de las políticas a ser analizadas con los resultados de la simulación se presentan a continuación. Inicialmente se pretendió evaluar políticas basada en el financiamiento de la



CONS\_MODEL: Consumo de Gasolina según este modelo.  
 CONS\_CHAHIN: Consumo de Gasolina según el estudio de Chahín (1993)  
 CONS\_UPME: Consumo de Gasolina según último estudio de UPME (1997)

Figura 3 Consumo total de gasolina en Colombia

conversión o del sobre costo del vehículo nuevo a gas, pero se observó que al variar la tasa de interés de dicho financiamiento y el período de pago, no se presentan efectos significativos sobre la penetración del gas vehicular, por lo tanto se tuvo en cuenta otro tipo de análisis de políticas e incentivos.

Una de las políticas analizadas fue la aplicación del plan de gas natural en el sector transporte en un 20% del país, lo cual es muy razonable por la dificultad de divulgación en todo el país, al igual que la falta de oferta inmediata. La Tabla 3 muestra como es el ahorro en consumo de gasolina sin ningún otro incentivo.

Se puede observar cómo se obtiene un porcentaje de ahorro alto (del orden del 11%) que significa una disminución significativa en la demanda por gasolina en el país.

En la Figura 4 se observa que la mayor penetración se da en el tipo de vehículos autos, después en los camperos y por último en los pick-ups, es decir, se da en la misma proporción a la magnitud del parque de cada tipo de vehículo. Aquí se observa como, a pesar de la poca divulgación (solo el 20%),

se representa un ahorro hasta del 11% en el consumo de gasolina

Tabla 3 Ahorro de gasolina con plan de gas vehicular en 20%, sin otros incentivos

AHORRO DE GASOLINA (Millones de Galones)				
Time	AHOR TOT GASO	CONS TOT GASO S	AHOR PORC	
1,995	0.00	1,955.48	0.00	
1,996	0.00	1,977.63	0.00	
1,997	0.00	2,008.66	0.00	
1,998	0.00	2,047.24	0.00	
1,999	0.00248	2,092.89	0.00000118	
2,000	153.20	2,145.67	0.0714	
2,001	211.30	2,205.24	0.0968	
2,002	235.42	2,270.07	0.104	
2,003	250.32	2,339.82	0.107	
2,004	260.64	2,414.53	0.108	
2,005	270.06	2,494.25	0.108	
2,006	279.53	2,579.03	0.108	
2,007	289.37	2,668.96	0.108	
2,008	299.72	2,764.09	0.108	
2,009	310.62	2,864.52	0.108	
2,010	322.10	2,970.34	0.108	

AHOR\_TOT\_GASO: ahorro total de gasolina.  
 CONS\_TOT\_GASO\_GS: es el consumo total de gasolina sin el plan de gas.  
 AHOR\_PORC: es el porcentaje de ahorro de gasolina.

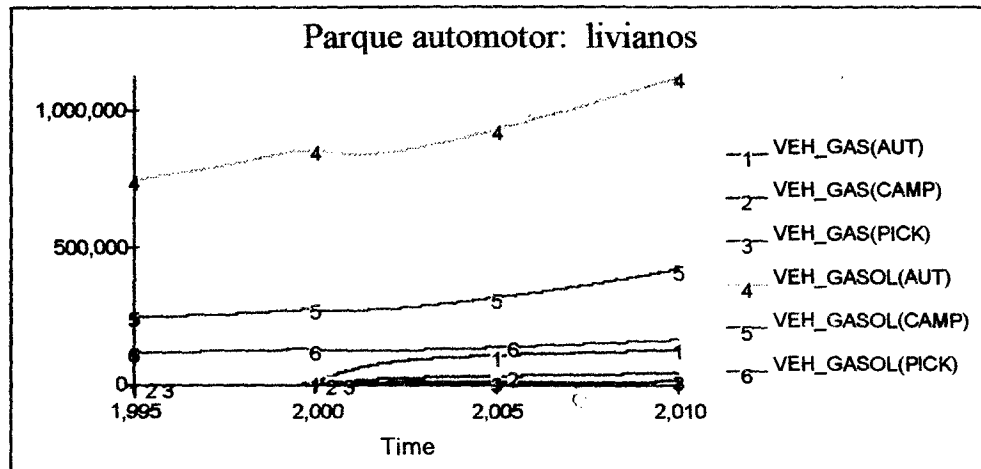


Figura 4 Vehículos livianos a gas, plan de gas vehicular en un 20%

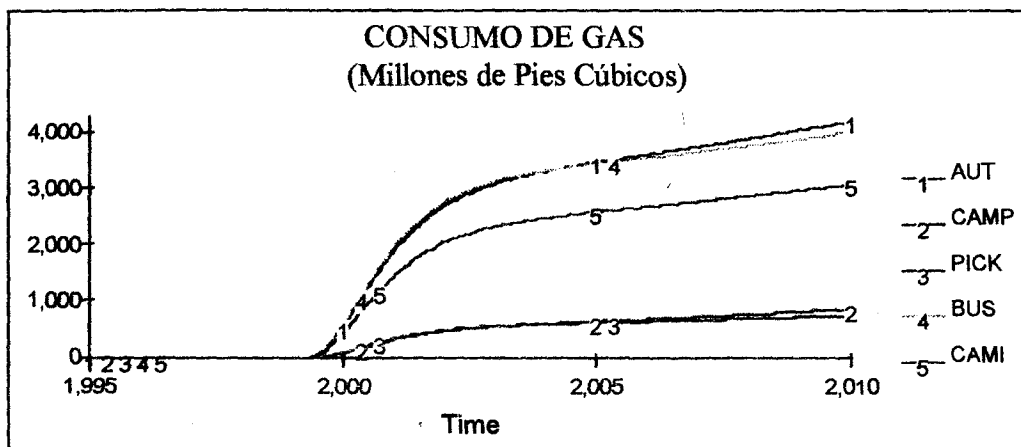


Figura 5 Consumo de gas, plan de gas vehicular en un 20%

El consumo desagregado por tipo de vehículo se puede observar en la figura 5.

Otras políticas consideradas incluyen los aumentos y rebajas de los combustibles. En un primer escenario se aumentó en el costo de operación de los vehículos a gasolina en un 20%. En el segundo se consideró la eliminación de impuestos, mientras en un tercer escenario se consideró el aumento en un 10% del costo de operación de los vehículos a gasolina y la reducción en un 10% del costo de operación de los vehículos a gas (los aumentos y rebajas en el costo

de operación es equivalente a aumentar o rebajar el costo del combustible). En la Tabla 4 se muestra el ahorro de gasolina y la diferencia porcentual respecto al caso en que no exista el plan gas. En esta tabla, las tres primeras columnas son el ahorro total de gasolina y las otras el porcentaje para cada caso.

También se analizó un plan de masificación del gas en el sector transporte terrestre con una difusión del 50%. La importancia de esta política es analizar las implicaciones de difundir ampliamente el plan gas para su mayor penetración. No se puede perder de



vista que la difusión depende también de la estructura de la oferta del gas, es decir, para que se puede difundir el plan es necesario hacer inversiones para el transporte, distribución y mercadeo del gas, además de una regulación que garantice su buen uso.

La Tabla 5 muestra año tras año la evolución del consumo de gasolina en millones de galones (CONS\_TOT\_GASOL), el consumo de gas en millones de pies cúbicos (COS\_TOT\_GAS), el ahorro de gasolina en millones de galones (AHOR\_TOT\_GASO) y la diferencia porcentual del ahorro de gasolina respecto al consumo de gasolina sin el plan de gas vehicular (AHOR\_PORC). En esta tabla se observa que el ahorro de gasolina aumenta especialmente entre los años 1999 y 2005, y a partir de ese año, comienza un ahorro creciente pero constante en términos porcentuales. Es importante

resaltar que el ahorro de gasolina se estabiliza en un 27,1%, muy superior a lo observado cuando la difusión del plan de gas vehicular era el 20%, ya que en ese caso el ahorro se estabilizaba alrededor del 11%.

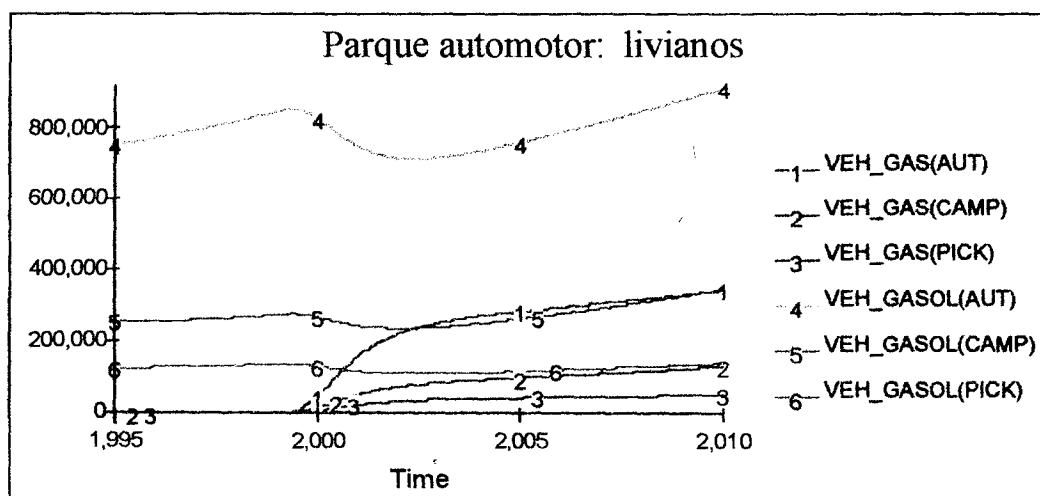
La penetración del gas en el sector transporte terrestre para los vehículos livianos se observa en la Figura 6. Se puede observar como la penetración es mucho más agresiva que en el caso de difusión del 20%, obteniéndose mucha mayor cantidad de vehículos a gas. Se puede observar también como la penetración del gas se da apenas comienza el plan y se estabiliza en un crecimiento constante, tanto de vehículos a gasolina como a gas, a partir de los siguientes 4 o 5 años. Esta misma situación se da para los vehículos pesados, es decir, para los buses y camiones.

**Tabla 4 Ahorro de gasolina con plan de gas vehicular en 20%. diversos incentivos**

AHORRO DE GASOLINA (Millones de Galones)						
Time	AHOR_TOT_GASO	AHOR_TOT_GASO	AHOR_TOT_GASO	AHOR_PORC	AHOR_PORC	AHOR_PORC
1,995	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,996	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,997	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,998	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,999	0.00248	0.00264	0.00266	1.1834e-6	1.2618e-6	1.2695e-6
2,000	153.19	163.34	164.34	0.0714	0.0761	0.0766
2,001	211.29	225.29	226.67	0.0958	0.102	0.103
2,002	236.40	252.07	253.62	0.104	0.111	0.112
2,003	250.30	266.88	268.53	0.107	0.114	0.115
2,004	260.62	277.89	279.60	0.108	0.115	0.116
2,005	270.04	287.93	289.70	0.108	0.115	0.116
2,006	279.51	298.03	299.86	0.108	0.116	0.116
2,007	289.35	308.52	310.42	0.108	0.116	0.116
2,008	299.70	319.56	321.52	0.108	0.116	0.116
2,009	310.60	331.18	333.22	0.108	0.116	0.116
2,010	322.08	343.42	345.53	0.108	0.116	0.116

**Tabla 5 Evolución de combustibles y ahorro con plan de gas vehicular en 50%**

CONSUMO DE GAS Y GASOLINA (Plan Gas Vehicular en un 50%)					
Time	CONS_TOT_GASOL	CONS_TOT_GAS	AHOR_TOT_GASO	AHOR_PORC	
1,995	1,955.48	0.00	0.00	0.00	
1,996	1,977.63	0.00	0.00	0.00	
1,997	2,008.68	0.00	0.00	0.00	
1,998	2,047.24	0.00	0.00	0.00	
1,999	2,092.88	709.91	0.00619	0.00000296	
2,000	1,762.69	43,910,546.75	382.98	0.178	
2,001	1,677.01	60,564,007.47	528.22	0.24	
2,002	1,679.06	67,763,034.08	591.01	0.26	
2,003	1,714.07	71,746,479.75	625.75	0.267	
2,004	1,762.98	74,704,330.38	651.55	0.27	
2,005	1,819.14	77,404,690.28	675.10	0.271	
2,006	1,880.27	80,117,878.07	698.77	0.271	
2,007	1,945.58	82,940,025.18	723.38	0.271	
2,008	2,014.84	85,906,402.20	749.25	0.271	
2,009	2,088.02	89,031,109.25	778.51	0.271	
2,010	2,165.14	92,320,977.30	805.20	0.271	



**Figura 6 Vehículos livianos a gas, plan de gas vehicular en un 50%**

Otra política analizada es aplicar el plan de gas solamente a los buses y a los taxis, debido a la facilidad con que se puede adelantar la sustitución y renovación en estos tipos de vehículos, a los regimenes especiales de servicio público que los rigen y al alto consumo de gasolina que poseen. La política analizada presenta una difusión de un 50% para buses y taxis.

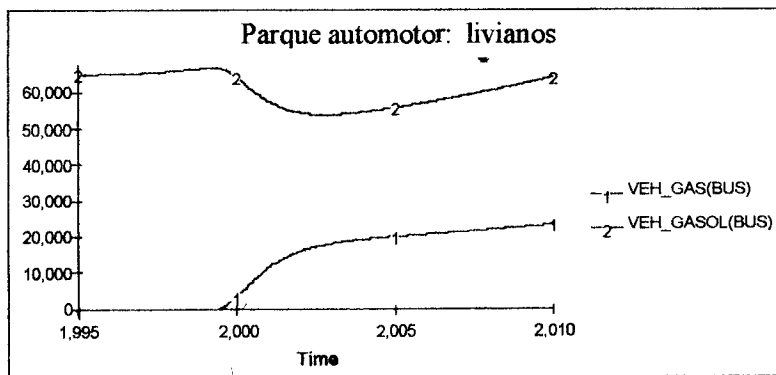
Los resultados de esta política se muestra en la Tabla 6. En esta se observan ahorros de gasolina de más de

350 millones de galones por año, una diferencia porcentual de ahorro rápidamente creciente entre el año 1999 y el año 2003, y luego variaciones entre el 12,8% y 13% de ahorro de gasolina, cifra importante ya que el plan estaría difundido solo en un 50% de los buses y taxis del país.

La Figura 7 muestra la penetración del gas en los buses (serie 1), además de los buses que continúan con gasolina (serie 2). En esta figura se observa como el parque de buses es superior a los 20000 vehículos.

**Tabla 6 Evolución de combustibles y ahorro con plan de gas vehicular en el 50% de buses y taxis**

CONSUMO DE GAS Y GASOLINA (Para el Plan de Gas en el 50% de Buses y Taxis)					
Time	CONS	TOT GASOL	CONS TOT GAS	AHOR TOT GASO	AHOR PORC
1,995		1,955.48	0.00	0.00	0.00
1,996		1,977.63	0.00	0.00	0.00
1,997		2,008.68	0.00	0.00	0.00
1,998		2,047.24	0.00	0.00	0.00
1,999		2,092.89	343.71	0.003	0.00000143
2,000		1,960.03	21,284,428.10	185.64	0.0865
2,001		1,949.34	29,340,183.14	255.90	0.116
2,002		1,984.30	32,765,631.23	285.77	0.126
2,003		2,038.07	34,598,431.83	301.76	0.129
2,004		2,101.30	35,914,121.25	313.23	0.13
2,005		2,170.73	37,093,447.06	323.52	0.13
2,006		2,245.23	38,272,058.90	333.80	0.129
2,007		2,324.46	39,499,180.73	344.50	0.129
2,008		2,408.30	40,793,599.10	355.79	0.129
2,009		2,496.78	42,163,419.78	367.74	0.128
2,010		2,589.96	43,613,040.11	380.38	0.128



**Figura 7 Buses a gas. Difusión del 50%**

## 6. Aspectos ambientales

Los combustibles usados por el sector transporte terrestre emiten a la atmósfera una gran cantidad de residuos contaminantes los cuales deterioran la calidad del aire, especialmente en las grandes ciudades. Una de las medidas que se han empleado para reducir las emisiones de gases tóxicos y de invernadero en el sector transporte consiste en impulsar la utilización de tecnologías que emplean combustibles alternativos como gas natural o gas licuado del petróleo, además de las mejoras tecnológicas a los combustibles tradicionales que mitiguen el impacto ambiental.

Los vehículos conforman el principal grupo contaminante del sector transporte. En el año 1990, aportaron el 60% del total de emisiones de los mayores contaminantes en el mundo (EIA, 96). El interés por las emisiones de contaminantes se extiende a todo el ciclo de vida de los vehículos y del combustible. Sin embargo, la escasez de información y la incertidumbre en la cuantificación de los impactos ambientales, hacen difícil estimar la contribución del ciclo de vida de un vehículo de determinado combustible al total de las emisiones de un gas en particular (EIA, 1996).

El monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles son los gases emitidos por el sector transporte que más afectan la

calidad del aire desde el punto de vista de volúmenes generados. Los principales problemas de salud son causados por el material particulado, los sulfatos y nitratos.

La sustitución es una de las alternativas que existen para la reducción de las emisiones de gases tóxicos y de invernadero en el sector transporte. Entre los combustibles alternativos que se han considerado en diferentes programas de sustitución (EIA, 1996; WRI, 1997) se encuentran el gas natural comprimido GNC, el gas licuado del petróleo GLP, el metano y el metanol y combinaciones de combustibles en un mismo vehículo. Además de éstos combustibles se han estudiado tecnologías alternativas como vehículos eléctricos y celdas de hidrógeno.

El gas natural es considerado un combustible limpio, en el sentido de que sus emisiones atmosféricas son menores que las de otros combustibles. Sin embargo, en la determinación del impacto de su uso se deben tener en cuenta las emisiones que ocurren en la producción, procesamiento y transporte.

Para la estimación de emisión de contaminantes no se cuenta con procedimientos analíticos como ecuaciones o tablas, sino solo datos experimentales que han sido medidos por diferentes métodos. Por lo tanto, para estimar la reducción de emisión de contaminantes se procede a comparar las emisiones de vehículos a gas con las emisiones de vehículos a gasolina tomados como base.

La reducción de emisiones de gases en el transporte depende del tipo de combinación tecnología/combustible empleada. No es posible saber cuál tecnología será instalada en realidad en los vehículos, ni cuál será la transacción entre emisiones y desempeño. Debido a la incertidumbre en estos factores, el nivel de emisiones futuras es incierto. Para manejar este hecho, se establecen escenarios de emisiones futuras.

Wang y otros (1993) han establecido los escenarios de alta y baja reducción presentados en las tablas 7 y 8 para distintos tipos de tecnología. En estos escenarios se asume que los futuros vehículos a gasolina usarán gasolina "reformulada".

Las emisiones se agrupan en cuatro tipos:

1. Compuestos volátiles orgánicos distintos del metano (NM VCO) que incluyen cuatro compuestos tóxicos: 1,3-butadieno, benceno, formaldehídos y acetaldehídos.
2. Compuestos volátiles orgánicos distintos del metano después de aplicar factores de ajuste de reactividad, RAFs. Los factores de ajuste de reactividad miden la tendencia de estos gases a formar ozono bajo ciertas condiciones atmosféricas, dados pequeños cambios en la concentración de hidrocarburos.
3. Monóxido de carbono, CO.
4. Óxidos de nitrógeno, NO<sub>x</sub>.

El comportamiento de las emisiones para el escenario de reducción baja se observa en la Figura 8, en la cual, las emisiones de CO y de NO<sub>x</sub> de los vehículos a gas según las normas del medio Ministerio del Medio Ambiente (Decreto 948, 1995), las emisiones están en porcentaje volumétrico. Las reducciones porcentuales respecto a las emisiones de gasolina son las mostradas en la tabla de reducción de emisiones para el escenario de reducción baja.

La reducción de contaminantes disminuye cada vez que hay mas conversión de los vehículos a gasolina por gas. Es decir, en caso de que la difusión sea mayor que la planteada en este escenario, disminuyen las emisiones de contaminantes y sigue en pie la posibilidad de aumentar la difusión del plan con toda la infraestructura y normatividad que esto necesita.

En general, el escenario de reducción alta disminuye notablemente la emisión de contaminantes de los vehículos a gas debido a que es un escenario más optimista en el mejoramiento tecnológico de los vehículos a gas.

El beneficio ambiental de los vehículos a gas es un mecanismo que ayuda a la conversión de vehículos a gasolina por gas, ya que representa un incentivo ambiental, y por lo tanto este es un elemento que puede contribuir con una mayor difusión del gas en el sector transporte terrestre.

**Tabla 7 Escenarios de reducción de emisiones por exhosto (% de gasolina)**

	<b>Compuestos volátiles orgánicos diferentes del metano, NMVOC</b>	<b>NMVOC RAF*</b>	<b>4 CO</b>	<b>5 NOx</b>
<b>Escenario de reducción baja</b>				
Vehículos GLP	-30	-64.3	-20	0
Vehículos duales GNC	-30	-87.1	-20	0
Vehículos GNC	-40	-89.0	-30	0
<b>Escenario de reducción alta</b>				
Vehículos GLP	-60	-79.6	-40	0
Vehículos duales GNC	-60	-92.6	-40	0
Vehículos GNC	-70	-94.5	-50	-10

\*VCOs después de aplicar factor de reactividad

Tabla tomada de: Wang y Otros Emission impacts, etc-1992

**Tabla 8 Escenarios de reducción de cuatro contaminantes tóxicos (% de gasolina)**

	<b>1-3 butadieno</b>	<b>Benceno</b>	<b>formaldehído</b>	<b>Acetaldehído</b>
<b>Escenario de reducción baja</b>				
Vehículos GLP	-90.5	-95.9	-43.8	-33.80
Vehículos duales GNC	-96.2	-98.1	-113.8	-54.1
Vehículos GNC	-96.8	-98.4	-83.3	-60.6
<b>Escenario de reducción alta</b>				
Vehículos GLP	-94.6	-97.6	-17.8	-62.2
Vehículos duales GNC	-97.8	-98.9	-22.2	-73.8
Vehículos GNC	-98.4	-99.2	-8.4	-80.3

Tabla tomada de: Wang y Otros Emission impacts, etc-1992

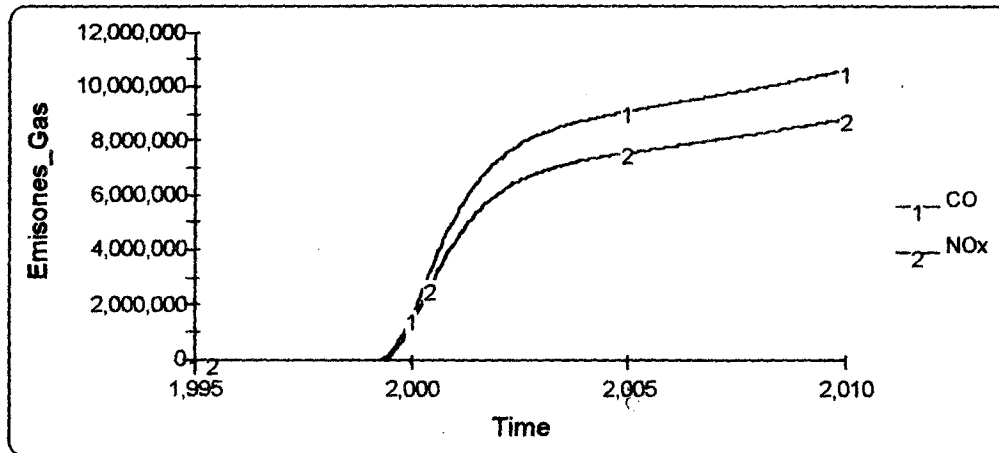


Figura 8 Emisiones de Co y Nox en porcentaje volumétrico de los vehículos

Además de la política de sustitución de combustibles, se diseñaron otras estrategias para reducir emisiones de contaminantes a través de la optimización del rendimiento y uso del parque automotor existente y de los sistemas de transporte. Se buscó una reducción del consumo de gasolina que se obtiene por medio de las medidas de optimización del parque automotor, y que se traduce en una reducción directa de las emisiones de gases al medio ambiente. Se diseñaron escenarios de análisis de disminución del recorrido promedio y la reducción del consumo específico.

Un resultado de estos escenarios se muestra en la Figura 9 la cual muestra como es la reducción del consumo de gasolina en porcentaje para los buses y camperos. En esta se observa que la reducción en el ahorro de gasolina en los buses llega casi al 10% al final del período de simulación.

A pesar de que no es posible cuantificar la reducción de emisiones de contaminantes al mejorar el consumo específico de los vehículos o reducir el recorrido promedio, la disminución es evidente, ya que el menor consumo de gasolina reduce la emisión de contaminantes.

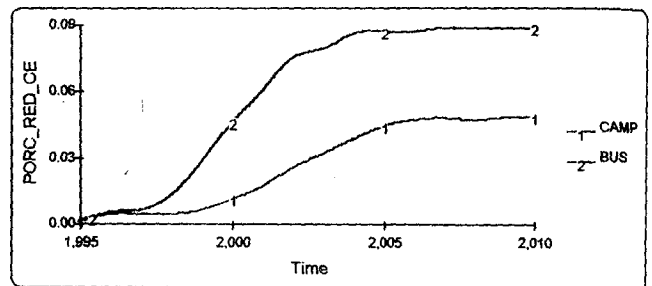


Figura 9 Reducción del consumo de gasolina en buses con penetración del gas (20%) y aumento gradual del consumo específico

El Ministerio del Medio Ambiente y el Ministerio del Transporte son los encargados de la expedición de las normas que controlan la calidad del aire en el transporte terrestre en Colombia. Las normas que establecen los mecanismos de control y las emisiones máximas permisibles para las fuentes móviles están contenidas en el decreto 948 de junio de 1995 y la resolución 005 de enero de 1996.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

A continuación se presentan algunas conclusiones y recomendaciones:

- Para la penetración del gas como combustible alternativo a la gasolina se deben dirigir los esfuerzos a una eficaz difusión del plan, apoyándose en otro tipo de incentivos que ayuden a la implantación del plan de gas vehicular tales como impuestos, sobrecostos para los vehículos a gasolina, y rebajas y subsidios para los vehículos a gas.
- La difusión del plan de gas en el sector transporte terrestre depende de la estructura de la oferta, por lo tanto se debe garantizar la provisión del combustible para que halla motivación a la conversión al uso del gas.
- Para lograr adelantar un plan integrado de uso racional de la energía en el sector transporte, es necesario incentivar el uso de formas alternativas de transporte, adicionales al uso de combustibles alternativos, tales como programas de transporte masivo o promover los macroproyectos del metro de Bogotá y Cali.
- El desarrollo del modelo tuvo inconvenientes debido a la escasez y falta de calidad de la información. Por lo tanto se recomienda crear políticas de manejo integral de la información y acceso a esta, para provecho de todos.
- La penetración del gas en el sector transporte está fundamentada en la economía que ello representa, pero se presenta una ventaja adicional como es la mejora ambiental.
- Para el uso del gas natural como combustible alternativo es necesario tener en cuenta los aspectos de seguridad con que se debe trabajar, y la necesidad de crear una regulación que proteja todos los entes que participan.
- Se recomienda incorporarle a este modelo la parte de la dinámica de la oferta de combustibles, ya que esta afecta la demanda de los mismos.

## Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimiento a la Unidad de Planeamiento Minero Energética del Ministerio

de Minas y Energía y a COLCIENCIAS por la financiación del proyecto.

## Referencias

- DNP, COLCIENCIAS, FONADE, OEA, 1990. Programa de la Gestión de la Demanda de la Tecnología Energética. Bogotá, Colombia.
- DYNER I., FRANCO C. J. y PEÑA G., 1995. Modelo Nacional para el Apoyo a la Formulación de Políticas en Materia de Uso Racional de Energía. Revista Energética N°15. Medellín, Colombia, pp 51 – 62.
- EIA, 1996. Alternatives to traditional transportation fuels: an overview. DOE, EE. UU.
- EIA, 1997. Alternatives to Traditional Transportation Fuels 1996. Department of Energy. Washington, DC. EE. UU.
- FORD A., 1995. "Simulating the Controllability of Feebates". System Dynamics Review Vol 11, N°1. EE. UU., pp 3 - 29.
- GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA, 1990. Escenarios Energéticos para Antioquia. Medellín, Colombia.
- GODDARD W.B., GODDARD C.B., 1997. Applied Research in determining the total environmental costs of electrical generating systems. Renewable Energy Journal N.718, EE. UU.
- GREENE D. L., 1997. Survey evidence on the importance of fuel availability to choice of alternative fuels and vehicles.. DOE, EE. UU.
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, 1982. Estudio Nacional de Energía, ENE. Bogotá, Colombia.
- MOTTA. Compressed natural gas and liquified petroleum gas conversions: the national renewable energy laboratory's experience. Doe. Washington , EE. UU.

OEA, Departamento de Desarrollo Regional, 1986. Consumo, Sustitución y Conservación de Energía en el Sector Transporte. Bogotá, Colombia.

TORRES J. E., 1995. "Dinámica Potencial del GLP como Combustible Automotor en el Transporte Público Metropolitano en Colombia". Revista Energética N°15. Medellín, Colombia, pp 70 - 84.

UPME, 1997. Evaluación de la Conveniencia del Uso de GNC o GLP como Combustible Automotor. Bogotá, Colombia.

UPME, 1997. Mercado de Combustibles en el Transporte Automotor de Colombia. "Determinación y Seguimiento". Bogotá, Colombia.

UPME, 1997. Plan Energético Nacional "Autosuficiencia Energética Sostenible". Bogotá, Colombia.

WANG Q., SPERLING D., OLMSTEAD J., 1993. Emission Impacts, Life-Cycle Cost Changes and Emission Control Cost-Effectiveness of Methanol, Ethanol, Liquefied Petroleum Gas, Compressed Natural Gas and Electricity-Fueled Vehicles. Institute of Transportation Studies, University of California, EE. UU.