



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE MINAS**

**Escuela de Geociencias y Medio Ambiente  
Postgrados en Gestión Ambiental  
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo**

***REQUISITO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE:  
Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo***

***INCIDENCIA DEL PROGRAMA DE RESTRICCIÓN VEHICULAR “PICO Y PLACA” SOBRE  
LAS EMISIONES ATMÓSFERICAS EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE  
ABURRÁ***

**Presentado por:  
PAULO CESAR PEREZ LAMBRAÑO**  
Ingeniero Sanitario

**Director:  
EDISON VASQUEZ SANCHEZ**  
Administrador de Empresas, MSc. en Economía

**SEDE MEDELLÍN  
2009**

A mamá, papá y hermana  
Sepan que su guía, apoyo y cariño  
Me permitieron sortear esta aventura académica.

A mi esposa Alejandra, por instalarse en mi vida,  
Brindarme amor y compañía

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo no se habría podido preparar sin la generosa colaboración de muchas personas y organizaciones a quienes expreso mi agradecimiento. Deseo extender un especial reconocimiento a mi director de tesis Edison Vásquez, por su dedicación y constantes aportes al trabajo, a mi formación académica y personal.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, que gracias a su beca para estudiantes sobresalientes me permitió realizar esta maestría.

A la COMISION NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE DE CHILE (CONAMA), que gracias a sus valiosos aportes de información se pudo encausar este estudio. En especial al Ingeniero Roberto Martínez quien fue el canal para lograr ágilmente información y sugerencias valiosas para este trabajo.

AI AREA METROPOLITANA DE VALLE DE ABURRÁ, que proporciono valiosos estudios que se convirtieron en fuente de referencia y apoyo en este trabajo.

A los jurados y revisores de este trabajo.

A los profesionales y profesores que me brindaron orientación para desarrollar esta tesis y/o la propuesta de investigación: Clara Villegas, Javier Blanco, Genaldo Rios, Pavel Herrera, Mauricio Correa

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

# CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. MARCO CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL</b>	<b>4</b>
1.1 El objeto de estudio	4
1.2 La movilidad y su incidencia en el bienestar	6
1.3 El programa de restricción vehicular como instrumento de comando y control.	11
1.4 La evaluación ambiental como posibilidad metodológica para analizar el impacto de un programa de restricción vehicular.	16
<b>2. MARCO METODOLÓGICO</b>	<b>21</b>
2.1 El modelo y su alcance	26
2.2 Caracterización de la unidad de análisis	29
2.3 Dimensiones Consideradas	34
2.4 Contaminantes Estimados	34
<b>3. DEFINICIÓN DE ELEMENTOS DE ANÁLISIS</b>	<b>35</b>
3.1 Parque Automotor	35
3.2 Proyección en el tiempo del parque automotor	36
3.3 Actividad vehicular (Km/día)	39
3.4 Estimación de las emisiones del parque automotor objeto de la medida “pico y placa” (PPK).	40
3.5 Factores de emisión	42
3.6 Valoración económica del impacto de las medidas en estudio	45
3.7 Proyección en el tiempo de la valoración	49
<b>4. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS</b>	<b>50</b>
4.1 Escenario actual (A)	52
4.2 Escenario futuro (M)	53
<b>5. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>55</b>

5.1	Resultados y análisis escenario actual (A)	55
5.1.1	Parque automotor	55
5.1.2	Parque automotor restringido.	56
5.1.3	Costos netos condición mas probable	57
5.1.4	Beneficios sociales condición mas probable	59
5.1.5	Costos netos condición optimista	60
5.2	Resultados y análisis escenario futuro (M)	61
5.2.1	Parque automotor	62
5.2.2	Parque automotor restringido	62
5.2.3	Costos netos condición mas probable	62
5.2.4	Beneficios sociales	63
5.2.5	Costos netos condición optimista	65
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>67</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>70</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>77</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla No.</b>		<b>Pág.</b>
Tabla 1	Vehículos particulares sujetos al “Pico y Placa” en Medellín	12
Tabla 2	Vehículos de transporte público individual (taxi) y especial (placa blanca) sujetos al “Pico y Placa” en Medellín	12
Tabla 3	Supuestos considerados para el cálculo de los costos asociados.	24
Tabla 4	Supuestos considerados para el cálculo de los ahorros asociados.	26
Tabla 5	Distribución vial del municipio de Medellín.	30
Tabla 6	Distribución del parque automotor	36
Tabla 7	Evolución del parque automotor particular e índice de motorización.	38
Tabla 8	Nivel de actividad vehicular	39
Tabla 9	Clasificación de la antigüedad de parque automotor	44
Tabla 10	Factores de emisión NOx para vehículos a gasolina (g/Km).	44
Tabla 11	Tipo de vías y sus velocidades promedio.	44
Tabla 12	Factores de Emisión AMVA/CORINAIR empleados en el estudio.	45
Tabla 13	Valoración marginal de reducciones de emisiones contaminantes (US/ton reducida)	46
Tabla 14	valoración marginal de reducciones de emisiones contaminantes (US/ton reducida)	47
Tabla 15	Variación porcentual PPP Chile vs PPP Colombia.	48
Tabla 16	Valoración utilizada (US por tonelada reducida).	48
Tabla 17	Variación porcentual PPP Colombia (2003-2006)	49
Tabla 18	Esquema de comparación de escenarios.	50
Tabla 19	Sondeo de opinión sobre el PPK	53
Tabla 20	Parque automotor particular AMVA (2006-2015).	56
Tabla 21	Parque automotor particular restringido (2006-2015)	57
Tabla 22	Costos asociados, ahorros asociados y costos netos condición más	58

	probable (2006-2015).	
Tabla 23	Toneladas de emisiones/día evitadas por PPK (2006-2015)	59
Tabla 24	Beneficios sociales generados por la medida PPK (2006-2015)	60
Tabla 25	Costos asociados, ahorros asociados y costos netos condición optimista (2006-2015)	61
Tabla 26	Costos asociados, ahorros asociados y costos netos condición más probable (2006-2015)	63
Tabla 27	Toneladas de emisiones/día evitadas por restricción vehicular modificada (2006-2015)	64
Tabla 28	Beneficios sociales generados por la medida de restricción vehicular modificada (2006-2015)	65
Tabla 29	Costos asociados, ahorros asociados y costos netos condición optimista (2006-2015)	66



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura No</b>		<b>Pág.</b>
Figura 1	Emisiones de los principales contaminantes del Valle de Aburrá en las dos principales actividades generadoras de contaminación atmosférica (UdeA, Politécnico y UPB, 1998).	9
Figura 2	Proporción de la población afectada por contaminación atmosférica en términos de la severidad del efecto en la salud (CONAMA, 2007)	10
Figura 3	Diferencias en emisiones contaminantes por antigüedad del vehículo (CIFUENTES, 2007)	14
Figura 4	Esquema del proceso clásico de evaluación costo-beneficio.	28
Figura 5	Municipio de Medellín (distribución por comunas)	30
Figura 6	Líneas de operación del sistema masivo de transporte Metro.	32
Figura 7	Evolución del parque automotor particular.	38
Figura 8	Nivel de actividad vehicular.	40
Figura 9	Variación de emisión del CO <u>vs</u> velocidad.	42
Figura 10	Variación de emisión del NOx <u>vs</u> velocidad.	42
Figura 11	PPP Chile vs PPP Colombia (2003-2007)	47
Figura 12	Esquema general de costos netos.	51
Figura 13	Esquema general de beneficios sociales.	52

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo No	Pág.
<b>Anexo 1</b>	79

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta una disertación en relación con la siguiente tesis: el programa de restricción vehicular denominado “Pico y Placa”, aplicado en el Municipio de Medellín con el fin exclusivo de mejorar la movilidad, puede modificarse y ser aplicado como una herramienta efectiva de comando y control ambiental que permita contribuir a la disminución de los niveles de contaminación atmosférica en la ciudad.

La tesis toma como base de sustentación teórica la economía neoclásica, y asume al mercado como la mejor forma de organización social para decidir racionalmente cómo asignar los recursos escasos ante diferentes alternativas de utilización y a los precios como medio para comunicar los deseos o limitaciones que las personas tienen para adquirir bienes y servicios variados y complejos<sup>1</sup>.

Teniendo en cuenta lo anterior y asumiendo que generalmente no se contabilizan los costos ambientales que genera la dinámica industrial; la economía neoclásica hace uso de los instrumentos económicos, como mecanismo de gestión que apoye, incentive y promueva las inversiones en tecnologías de producción limpia, infraestructura ambiental, y actividades de recuperación ambiental.<sup>2</sup>

Puesta a modo de pregunta la tesis sería: ¿Es viable, y de serlo en qué condiciones lo es, transformar el programa de restricción vehicular Pico y Placa en un instrumento para gestionar la contaminación atmosférica en el Municipio de Medellín?

El deterioro de la calidad del aire causado por la mayor movilidad, realizada por medio de vehículos automotores, es un problema en ascenso. En la unidad de análisis seleccionada, la cual forma parte de los diez municipios que conforman el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la principal causa de la contaminación del aire son las emisiones producidas por el parque automotor. Un estudio reciente ha estimado que en Colombia el costo medio de la contaminación del aire en zonas urbanas llega a ser de 1.5 billones de pesos por año, de los cuales el 65% se asocia con costos de mortalidad y el restante 35% con costos de morbilidad (LARSEN, et al., SÁNCHEZ-

---

<sup>1</sup> Basándonos en la denominada Ley de la Demanda que propone la teoría económica básica, expuesta claramente entre otras obras en: Emerys, 1988.

<sup>2</sup> La definición, uso y potencialidad de los instrumentos económicos como mecanismo de gestión ambiental, se pueden ampliar entre otras obras en: ACQUATELLA, Jean. 2001.

TRIANA, et al., 2006). Esta tesis aborda así un tema relevante, que suscita debate y es de interés para los diseñadores de la política pública ambiental.

El espacio metodológico para el propósito descrito considera la perspectiva monetarista de balance entre costos y beneficios asociables al programa a evaluar en dos escenarios posibles, el actual, como punto de referencia, y el cambio futuro propuesto, este enfoque es permeable al uso y aplicación de la dinámica de sistemas, herramienta que permite la modelación del problema estudiado, mostrando de manera simplificada una representación del fenómeno real observado, y también ofrece una plataforma computacional para la aplicación de los algoritmos numéricos que posibilitan las evidencias a favor de una respuesta potencial al interrogante planteado.

El ejercicio presentado dista notablemente de representar un balance completo, del lado de los costos no descuenta las posibles pérdidas por menor dinamismo productivo de algunos sectores económicos, en tanto que desde la perspectiva de los beneficios no adiciona la valoración de los ahorros en los tiempos de desplazamiento de las personas que se movilizan en los vehículos no sujetos a la restricción, lo cual puede representar un monto considerable, tampoco se incluye el valor de la potencial reducción en la accidentalidad, o de la reducción en el subsidio estatal al combustible tradicional dejado de consumir por los vehículos inmovilizados. En adición no se consideran todos los contaminantes atmosféricos de interés, por tanto quedan igualmente excluidos los beneficios de: evitar las emisiones asociadas a éstos al extender la restricción, evitar el deterioro de los inventarios de flora y fauna, evitar la depreciación acelerada de la infraestructura física por efectos de la lluvia ácida y el hollín, y evitar parte de la contaminación acústica.

Este trabajo de investigación se organiza y presenta de la siguiente forma:

En el capítulo 1, se presenta el marco metodológico que apoya el trabajo en la problemática de la congestión vehicular, y sus impactos asociados. Luego se describe de manera general los instrumentos de comando y control como mecanismo de gestión ambiental, se hace una revisión de los antecedentes de estas medidas en el ámbito nacional e internacional. Se detalla una revisión bibliográfica de los estudios que plantean mecanismos para evaluar las medidas de comando y control, relacionadas con la gestión del recurso aire.

En el capítulo 2, se plantea un modelo basado en el análisis costo-beneficio de la medida de restricción vehicular “Pico y Placa” (PPK) y una modificación futura. Este modelo hace uso de la dinámica de sistemas para simular el fenómeno y proporcionar los impactos económicos y sociales que arroja la aplicación de esta medida en dos escenarios (actual y futuro).

En el capítulo 3, se definen los elementos relevantes que componen el modelo de evaluación de la medida, donde de manera detalla, se muestran las fuentes y valores que estos asumen en el cálculo.

En el capítulo 4, se describen los dos escenarios de evaluación (actual y futuro) de la medida de restricción vehicular, las características y diferencias que define a cada uno de éstos.

El capítulo 5, detalla cuantitativamente los resultados que se obtienen en el proceso de modelación del fenómeno de aplicación de la medida de restricción vehicular en los dos escenarios planteados anteriormente.

Finalmente los capítulos 6 y 7, presentan las conclusiones, recomendaciones y apreciaciones asociadas al análisis de los resultados obtenidos en el proceso de evaluación de la medida de restricción vehicular, en los escenarios planteados.

## MARCO CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL

### 1.1 El objeto de estudio

La congestión de tránsito vehicular es un fenómeno en ascenso en las ciudades colombianas. La diversificación y mayor oferta de servicios crediticios, la oferta de vehículos a precios más accesibles, los ritmos de aumento del ingreso per capita medio, y las demandas de movilidad propias de la dinámica urbana han venido incidiendo de modo positivo en la adquisición de vehículos, lo cual se traduce en una mayor congestión, habida cuenta de que la capacidad de la malla vial de circulación no presenta la misma dinámica del parque automotor.

El parque automotor presenta una tasa de crecimiento anual del 6% en el período 1992 – 2002 en el país. El Área Metropolitana del Valle de Aburrá no es ajena a esta tendencia, dicha tasa para el periodo 1998 – 2002 es del 7% anual. Se estima que el parque automotor matriculado en 2008 es aproximadamente de 670.000 vehículos, de los cuales el 36% corresponde a motocicletas, 48% a automóviles, y el 16% restante son vehículos de mayor tamaño (ÁMVA, 2005; STTM<sup>3</sup>).

QUADRI Y SÁNCHEZ (1992) sostienen que el urbanismo y la especialización del uso del suelo aceleran los procesos de desplazamiento de personas y de bienes, acrecentando la demanda de transporte, en especial el que se realiza por medio de automotores, como signo característico de la dinámica imperante en las urbes, esta tendencia deriva en el deterioro constante de la calidad del transporte urbano.

La congestión vehicular trae consigo problemas de diversa índole. En efecto, el mayor flujo vehicular se traduce en aumento de los tiempos de viaje, aumento de los niveles de estrés, de accidentalidad y de contaminación. Todo ello presupone un mayor costo de la movilidad y por tanto un sobre costo de casi cualquier actividad socioeconómica. La contaminación por ruido se hace evidente, pero mas preocupante, por sus consabidos efectos en la salud humana, resulta ser el incremento de las emisiones de gases y de material particulado a la atmósfera, debido a que en presencia de mayor congestión vehicular los automotores deben permanecer más tiempo en

---

<sup>3</sup> Secretaría de Transporte y Tránsito de Medellín. Distribución del parque automotor, por tipo de vehículo, inscrito en el Valle de Aburrá, [en línea] <http://planeacion.gobant.gov.co/anuario2006/transporte/tr11.1.2.3.xls> (página consultada el 10 de junio de 2008).

funcionamiento (BOSCH et al., 2002). Se ha reconocido a las fuentes móviles como la principal causa de contaminación atmosférica en las ciudades, lo cual es especialmente cierto en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, donde a diario circulan cerca de 500.000 vehículos (CHAABAN et al., 2001). Se estima que el 86% de la contaminación del aire en las ciudades colombianas proviene del transporte terrestre<sup>4</sup>.

Para hacer frente al creciente aumento de la congestión vehicular las administraciones de los entes territoriales que conforman las urbes han aplicado una medida de comando y control, decretando una restricción organizada a la circulación de vehículos. No obstante tal restricción se aplica al margen de consideraciones sobre los impactos ambientales de las fuentes móviles, centrando el foco de atención en el objetivo genérico de mejorar el tráfico vehicular.

Atendiendo la importancia de avanzar hacia una gestión urbana más sostenible, entendida la sostenibilidad como el desarrollo de los procesos sociales, culturales y económicos en el espacio urbano de modo tal que se minimice la transferencia de costos ambientales a otras ciudades, regiones o países (PEARCE Y TURNER, 1995), esta tesis se propone contribuir con una disertación y una exposición evaluativa del programa pico y placa, como un instrumento de comando y control que permite mejorar el tráfico vehicular, pero además podría contribuir a disminuir los niveles de emisiones contaminantes en la ciudad de Medellín.

Un escenario de partida para el propósito descrito consiste en asumir la pregunta: ¿Ha contribuido el programa pico y placa a la disminución de los niveles de contaminación atmosférica en la ciudad de Medellín? La metodología empleada para obtener la respuesta servirá para abordar otra pregunta, subsiguiente en el análisis, ¿Puede una modificación al programa pico y placa contribuir a la disminución de los niveles de contaminación atmosférica en la ciudad de Medellín de manera significativa, al menos desde una perspectiva monetarista de balance entre costos y beneficios asociables al programa *modificado*? Estas preguntas, puestas en el contexto descrito, delimitan el objeto de estudio.

---

<sup>4</sup> URIBE, Juan. Lo que el humo se llevó. En: El Tiempo, Bogotá. (09, nov., 2005); p. 1-9, c. 4.

## 1.2 La movilidad y su incidencia en el bienestar

El ecosistema global provee al hombre de un escenario adecuado en el cual desarrollar sus actividades, tal escenario requiere de temperatura regulada, control de inundaciones, asimilación de desechos, suministro de aire limpio y de agua potable, entre muchos otros servicios ambientales.

En relación al sistema socioeconómico dicho ecosistema juega un doble papel, sirve de despensa de materiales y energía, útiles para los propósitos de satisfacción de necesidades y gustos del hombre, y sirve de sumidero de los desechos que generan los ciclos de producción y consumo de los bienes y servicios creados para satisfacer las necesidades y gustos referidos. (AZQUETA, 2002)

Hacer efectiva la función de despensa energética del ecosistema global puede reducir su capacidad para proveer ciertos servicios ambientales, tal es el caso de la asimilación de desechos arrojados al aire, como gases y material particulado provenientes de la quema de combustibles fósiles en los vehículos automotores, necesarios para movilizar personas y bienes.

La movilidad, en el contexto organizativo de la sociedad de consumo, es una condición necesaria para alcanzar un cierto nivel de bienestar, es una necesidad sentida, especialmente al interior de las zonas urbanas, donde habita gran parte de la población de casi cualquier país del mundo. En las ciudades las personas acceden a los lugares de trabajo, de formación, de adquisición de bienes y servicios, de residencia, usualmente después de desplazarse en un medio de transporte motorizado, que en mayor o menor proporción usa combustibles de fuentes fósiles. No sobra exponer que al igual que las personas, a tales lugares deben llegar los bienes materiales que los componen y que son objeto de demanda, y éstos se transportan usualmente por medios motorizados de transporte.

Al consumo del tipo de energía obtenido de fuentes fósiles, y de cualquier otra, se le considera un signo de desarrollo<sup>5</sup>, tanto más cuanto más alto sea tal consumo, pues presupone mayor dinámica de la producción y del consumo (AZQUETA, 2002). La movilidad en medios de transporte motorizados, la cual demanda un consumo

---

<sup>5</sup> Entendido desarrollo como lo define la comisión sobre el Medio Ambiente y el desarrollo, en su informe nuestro futuro común: Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades. Citado y expuesto ampliamente entre otras obras en: Naredo, 1996.



energético importante, hace parte de este presupuesto de bienestar social y económico. Si la movilidad representa una necesidad efectiva, la adquisición por parte de los individuos de los medios materiales e inmateriales necesarios para satisfacerla, aumenta la utilidad individual, y por efecto de agregación el bienestar colectivo.

La movilidad efectuada a través de vehículos que usan gasolina, diesel o gas natural como combustible, trae consigo unos costos, a modo de externalidades, usualmente poco visibles, y aun siendo muy visibles, no valorados monetariamente en el sistema de mercado. Tal es el caso de los mencionados problemas de aumento de los tiempos de viaje, aumento de los niveles de estrés, de accidentalidad, y de contaminación que acarrea el mayor flujo vehicular, especialmente en la calles de las urbes.

Las externalidades han sido definidas desde la economía ambiental, campo éste de análisis especializado de la disciplina económica, como los cambios positivos o negativos en el bienestar de una persona, que sin haber sido participe de las iniciativas de consumo o producción de otra persona, termina afectada por las acciones de referencia de ésta última<sup>6</sup>.

El aumento de los tiempos de viaje a causa del mayor flujo vehicular no debería conllevar un costo notable si se considera la disponibilidad de vías. El Banco Mundial estima necesario, como requisito para un desarrollo más o menos satisfactorio del transporte en las zonas urbanas, alcanzar al menos una malla vial que represente el 15% de la superficie urbana total. La mayoría de municipios colombianos está por debajo de este nivel, el área de influencia del estudio, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, cuenta con un promedio de 13.76%. La unidad de análisis seleccionada, el municipio de Medellín, supera este umbral, ubicándose en 20%.

Es necesario considerar que la mayor parte de la circulación de vehículos de la región metropolitana confluye en la vías del municipio de Medellín, por ser este el eje económico y administrativo, y estar ubicado en el centro geográfico del valle, dicha confluencia relativiza el indicador de disponibilidad de vías en el municipio (AMVA, 2006).

---

<sup>6</sup> Algunas argumentaciones y ampliaciones teóricas que aclaran el concepto de externalidades de mercado pueden encontrarse, entre otras obras, en: Hanley, 1997; Field, 1997.

No obstante, el patrón de crecimiento del área de influencia del estudio se ha caracterizado por ser un espacio urbano segmentado en intersticios inter-municipales, que implican mayores desplazamientos. Dado que la principal motivación para realizar los viajes en la ciudad son el trabajo y el estudio, los cuales generalmente tienen un similar horario de inicio y finalización, se presentan en estas horas eventos de congestión vehicular, los cuales van en aumento debido al ritmo de crecimiento del parque automotor, estimado en 10% anual en los últimos años. Se estima además que un vehículo recorre 50 Km/día en promedio, de éste el 70% se realiza en el Valle de Aburrá. (AMVA, 2006).

Los aspectos descritos, en conjunto, conllevan un costo de tiempo de viaje mayor, inciden en un mayor índice de accidentalidad, fenómeno éste agravado por los aumentos notorios del parque de motocicletas en la ciudad, y finalmente contribuyen al deterioro de la calidad del aire de la ciudad, valga decir, deterioro éste propiciado de modo notorio por el parque automotor que utiliza combustible diesel de poca calidad en su refinación, pues la norma internacional fija entre 15 y 50 partes por millón de azufre las permitidas en la emisión, el diesel distribuido localmente llega a emitir 4500 partes por millón<sup>7</sup>.

El mayor nivel de contaminación del aire por la emisión de gases y material particulado, y la incidencia nociva de este tipo de emisiones en la salud humana, es quizá el mayor y más preocupante costo, a modo de externalidad negativa, generado por la creciente movilidad realizada por medio de vehículos automotores (CIFUENTES, 2007).

Entre los gases, subproductos del uso de combustibles fósiles, se encuentra el dióxido de carbón (CO<sub>2</sub>), los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), los hidrocarburos (HC) y el monóxido de carbón (CO), este último especialmente letal por impedir la absorción de oxígeno, los otros por causar daños e infecciones respiratorias y contribuir a la lluvia ácida, la formación de humo y al calentamiento global del planeta (FRAUME, 2007).

El material particulado (MP) es uno de los contaminantes que más preocupa debido a las enfermedades y deterioros que causa a la salud humana, a éste se atribuyen incrementos en la mortalidad prematura, consultas por enfermedades respiratorias y

---

<sup>7</sup> "Montando sin la silla", Dinero, No. 290 (Nov. 2007), p. 50-52. ISSN 0122-1531. "El pico y placa ambiental", El Tiempo, 30/08/2006, p. 1/18.

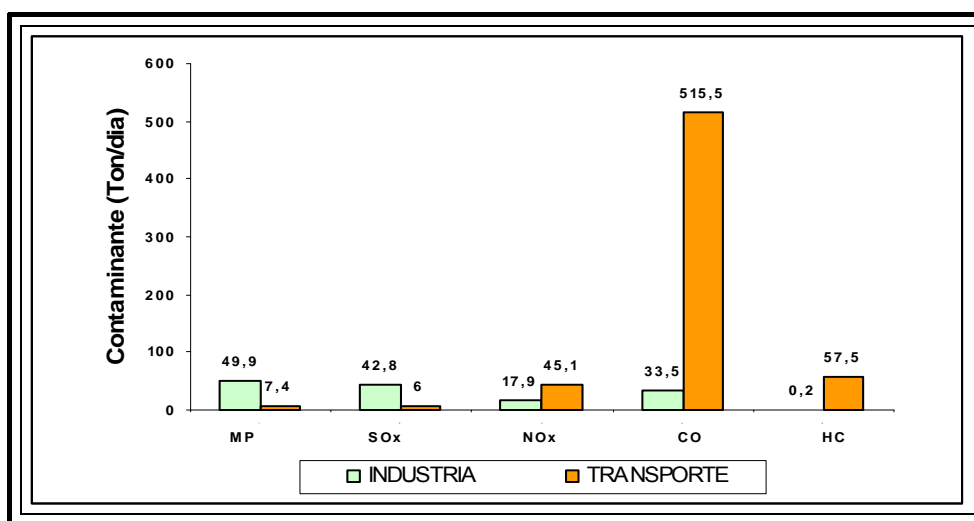
pérdidas de actividad laboral en adultos. Estas externalidades negativas repercuten directa e indirectamente en la productividad de las personas, lo que afecta finalmente la economía de un país (CONAMA, 2007).

Se ha estimado para Colombia que el costo medio de la contaminación del aire en zonas urbanas llega a ser de 1.5 billones de pesos por año, de los cuales el 65% se asocia con costos de mortalidad y el restante 35% con costos de morbilidad (LARSEN, et al., SÁNCHEZ-TRIANA, et al., 2006).

El deterioro de la calidad del aire causado por la mayor movilidad, realizada por medio de vehículos automotores, es un problema asociable a patrones variables de espacio y tiempo. Para la unidad de análisis seleccionada, la cual forma parte de los diez municipios que conforman el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se puede colegir que la principal causa de la contaminación del aire es la producida por el parque automotor<sup>8</sup>.

La Figura 1 muestra el inventario de emisiones para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, discriminando las emisiones contaminantes por tipo de fuente en el año 1998, tal composición no ha variado mucho en los últimos diez años.

**Figura 1.** Emisiones de los principales contaminantes del Valle de Aburrá en las dos principales actividades generadoras de contaminación atmosférica (UdeA, Politécnico y UPB, 1998).

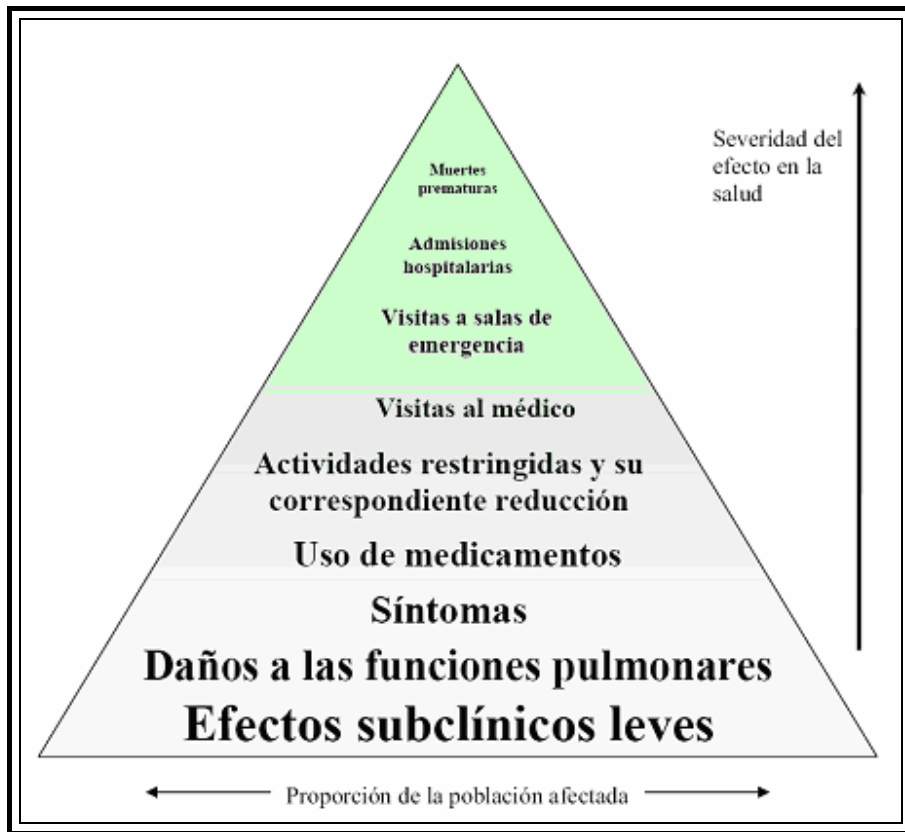


Fuente: AMVA, 1998

<sup>8</sup> Universidad de Antioquia, Universidad Pontificia Bolivariana, Politécnico Jaime Isaza Cadavid. Programa de Protección y control de la calidad del aire en el Valle de Aburra. Área Metropolitana Medellín (1998).

Algunos estudios exponen que a medida que se intensifican los efectos en la salud, la población afectada será menor en relación con el total de la población expuesta a un contaminante en particular. En consecuencia, los efectos subclínicos leves, los daños a las funciones pulmonares y los síntomas que aparecen, además del uso de medicamentos serán soportados por la mayor proporción de la población total que sufre los efectos del contaminante, en tanto las muertes prematuras, admisiones hospitalarias y visitas a salas de emergencia serán menos representativas en términos porcentuales, tal como se sugiere en la Figura 2 (CONAMA, 2007).

**Figura 2.** Proporción de la población afectada por contaminación atmosférica en términos de la severidad del efecto en la salud (CONAMA, 2007)



Fuente: Cifuentes, 2007

Considerando la exposición anterior se espera que una cierta disminución en los niveles de concentración de un contaminante beneficie a una proporción considerable de personas, evitándoles síntomas leves, tal proporción resultaría útil para establecer un punto de referencia en el diseño de medidas regulatorias que tiendan a modificar el nivel base establecido, con el objetivo de bajar los efectos provocados en la salud de la población expuesta (CONAMA, 2007).

Los beneficios sociales que surjan de la aplicación de cualquier medida de regulación ambiental se representan y evidencian como la sumatoria de los impactos evitados que ésta genere, especialmente en materia de salud. En el caso de estudio se trata de evaluar el resultado de los beneficios netos de extender el programa de restricción vehicular pico y placa a un mayor número de horas, centrando la atención del programa *modificado* en su capacidad de disminuir los niveles de emisiones atmosféricas contaminantes en la ciudad de Medellín.

### **1.3 El programa de restricción vehicular como instrumento de comando y control**

En la ciudad de Bogotá se inició la restricción al tráfico en Colombia, como medida para mejorar los problemas de congestión vehicular en horas pico, se adoptó una restricción horaria asociada al último dígito de la placa de los vehículos particulares, la medida se decretó en agosto de 1998, con ella se restringía la circulación del 40% de los vehículos particulares en la ciudad, cubriendo cuatro dígitos de placa diferentes en un período de cuatro horas por día, distribuidas en dos horas pico en la mañana y dos en la tarde.

La restricción es rotativa diariamente, por lo que a cada vehículo le corresponde a la semana dos días de restricción. Cuando inició la restricción de “pico y placa” la velocidad promedio de desplazamiento de los vehículos particulares era de 14 km/hora. Las mediciones realizadas en los años 2001 y 2002 mostraron que ese promedio aumentó a 25 km/hora. Posteriormente el programa se amplió para incluir los taxis, ajustando la medida a dos dígitos diarios para éstos de forma rotativa, incluyendo el día sábado (SECRETARÍA DE TRÁNSITO DE BOGOTÁ).

En la ciudad de Medellín se hizo sentida la necesidad de aplicar un programa de restricción vehicular, aprovechando la experiencia positiva de la ciudad de Bogotá, se acogió una variante del programa “*PICO Y PLACA*” en febrero del año 2005, bajo el Decreto 0097, con las características descritas en los cuadros 1 y 2.

**Tabla 1.** Vehículos particulares sujetos al “Pico y Placa” en Medellín.

<b>Día de aplicación de la restricción</b>	<b>Placas terminadas en los números</b>
Lunes	0 y 1
Martes	2 y 3
Miércoles	4 y 5
Jueves	6 y 7
Viernes	8 y 9

La rotación de la restricción asignada de cuatro horas/día para los vehículos particulares se ha hecho cada seis (6) meses, tales horas corresponden a las horas pico, es decir, entre las 06:30 y las 08:30, y entre las 17:30 y las 19:30, esto permite que las personas puedan programar sus actividades por periodos semestrales considerando la limitación en la disponibilidad de circulación de su vehículo. El programa de restricción vehicular pico y placa se trazó como objetivo disminuir la circulación del 20 % de los vehículos particulares.

**Tabla 2.** Vehículos de transporte público individual (taxi) y especial (placa blanca) sujetos al “Pico y Placa” en Medellín

<b>Jornada</b>	<b>Período horario</b>	<b>Lunes</b>	<b>Martes</b>	<b>Miércoles</b>	<b>Jueves</b>	<b>Viernes</b>
Mañana	06:00 a 13:00	0	2	4	6	8
Tarde	13:00 a 20:00	1	3	5	7	9

La medida de restricción vehicular cubre un 10% de los vehículos de transporte público individual (taxi) y especial (placa blanca), para este tipo de vehículos la rotación de la placa es mensual, la jornada, por su parte, se rota cada cinco meses (ALCALDÍA DE MEDELLÍN, 2005). Sin embargo a los seis meses, se modifica la medida y se amplía a una jornada completa a cada placa desde las 06:00 – 20:00 y cada 15 días<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> El calendario semestral y actualizado de aplicación de la medida para cada número de placa, se encuentra disponible en: <http://www.medellin.gov.co/alcaldia/jsp/modulos/anexos/picoyplacarotacion.jsp>

Al margen de las consideraciones sobre los impactos ambientales de las fuentes móviles, tal como lo son los vehículos automotores, el programa pico y placa en Medellín se adoptó centrando el foco de atención en el objetivo genérico de mejorar el tráfico vehicular. A la fecha, año 2008, no se han reportado indicadores de evaluación que revelen el grado de eficacia en la aplicación del programa.

En Colombia los programas de restricción al tráfico tienen como principal objetivo mejorar el tráfico vehicular, y no la gestión de la contaminación atmosférica, a nivel internacional este último carácter de utilidad es considerado como una opción factible de aprovechar a partir de este tipo de programas de comando y control.

Vale la pena revisar dos casos particularmente críticos en Latinoamérica, el mexicano y el chileno.

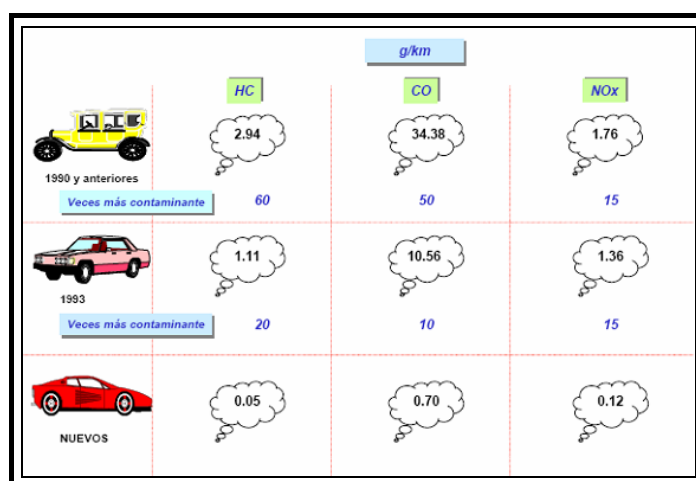
El programa “Hoy No Circula” fue creado a mediados de los años ochenta en la Zona Metropolitana del Valle de México, a partir de la iniciativa ciudadana de carácter voluntario denominada “Un Día Sin Auto”. En 1989 se da origen a la aplicación obligatoria del Programa Hoy No Circula (HNC), como un instrumento indirecto de restricción al tráfico con fines ambientales el cual, en sus inicio, se aplicó sólo para el período invernal, pero un año mas tarde se establece que éste tendrá una vigencia permanente. En 1992 comienza la exención de la restricción de circulación para los vehículos que utilizaban gas licuado de petróleo o gas natural comprimido. En 1997 se establece la exención de vehículos a gasolina de bajo nivel de emisiones contaminantes, por lo que las unidades 1993 y posteriores que utilizaban convertidor catalítico fueron beneficiados con el holograma “0” de no restricción. En 1999 se incentivó la introducción al mercado mexicano de vehículos que cumplieran con normas internacionales, a los cuales se les exoneró del HNC y además se permitió no verificar sus emisiones durante sus primeros dos años de uso, identificándolos con el holograma “doble 0”.

El objetivo inicial del programa HNC fue disminuir los niveles de emisión de contaminantes, a través de la restricción diaria de la circulación del 20% del parque automotor matriculado en la Zona Metropolitana del Valle de México. Esta situación permitió reducir el consumo de 11.500 barriles diarios de combustible, la emisión de 30.000 toneladas anuales de contaminantes y permitir el cumplimiento anticipado de las normas de emisión 2001 durante 1999 y el 2000 (DIRECCIÓN GENERAL DE GESTIÓN DEL AIRE, 2004).

Se argumentó que el programa HNC indujo a que las familias adquirieran vehículos viejos adicionales, a fin de resolver el problema de circulación producto de la restricción, se señaló además que estos vehículos generalmente habían sido fabricados con peor tecnología y su impacto ambiental sería más severo. Según la Autoridad Ambiental de la Zona Metropolitana del Valle de México, tal fenómeno fue parcialmente cierto, se estimó que un 22% de los vehículos adquiridos al iniciar el programa HNC fueron del tipo descrito (CIFUENTES, 2007).

Los presupuestos anteriores suscitaron debate y obligaron a un análisis del impacto de la antigüedad del parque automotor sobre las emisiones contaminantes. En base a estudios encargados por la autoridad ambiental se concluyó que a mayor antigüedad del vehículo mayor contaminación emite éste, tal como se ilustra en la Figura 3.

**Figura 3.** Diferencias en emisiones contaminantes por antigüedad del vehículo (CIFUENTES, 2007).



Fuente: Cifuentes, 2007

Las cifras anteriores llevaron a determinar que los vehículos con más de diez años de antigüedad no podrían ser excluidos del programa HNC, dado el acelerado deterioro que causan, en el año 2004 se realizó la actualización del programa HNC, permitiendo incorporar los vehículos con convertidor catalítico con una antigüedad mayor a 10 años dentro del esquema de restricción vehicular, además se incluyeron nuevos criterios de exención que consideraran los niveles de emisión y edad de los vehículos, entre los cuales se cuentan el que los nuevos vehículos podrán obtener el holograma doble cero y estar exentos del programa, los vehículos con menos de diez años de antigüedad que cumplan con los límites de emisión podrán obtener el holograma cero



y quedar exentos del programa, los vehículos con más de diez años de antigüedad podrán obtener el holograma uno, si cumplen con los límites de emisión, y dejan de circular un día a la semana, y los vehículos modelo 1990 y anteriores sólo podrán obtener el holograma dos, e igualmente deberán dejar de circular un día a la semana.

En Chile la restricción vehicular surgió el año 1986 como una medida orientada a atender la emergencia de contaminación atmosférica por material particulado respirable (PM10) en la Provincia de Santiago. A finales de la década del 80 se tomó la decisión de mantener la restricción vehicular durante todos los meses de invierno, período comprendido entre mayo y agosto. A comienzos de los años 90 se extendió la medida a un número mayor de meses del año, e igualmente se aplicó en otras ciudades importantes del país (DEL FAVERO et al., 2000).

La medida se aplica a partir del mes de marzo de cada año a todos los vehículos motorizados de cuatro o más ruedas sin sello verde, es decir, sin convertidor catalítico, según el último dígito de la placa. La restricción se mantiene hasta el 30 de diciembre de cada año, de lunes a viernes, excepto los días festivos, y cubre un 20% de los autos particulares sin sello verde, entre las 7:30 y las 21:00 horas, el transporte escolar se restringe entre las 21:00 y las 6:30 horas del día siguiente, el transporte de carga se restringe en el área interior de un perímetro delimitado por vías, entre las 10:00 y las 18:00, y los buses de transporte público licitados y de transporte privado de pasajeros quedan restringidos entre las 10:00 y las 16:00 horas.

En la actualidad se llevan a cabo estudios y evaluaciones de la medida, utilizando modelaciones de diferentes escenarios bajo principios de dinámica de sistemas, en un intento por optimizar la aplicación de la medida de restricción vehicular de acuerdo con los planes de desarrollo y las políticas ambientales vigentes (CIFUENTES, 2007; CONAMA, 2007).

La evidencia de los casos expuestos deja al descubierto el potencial de los programas de restricción vehicular como instrumentos de comando y control, creados mediante decreto por los organismos de gobierno público, y aplicados bajo un carácter normativo-cohercitivo, reflejo del poder monopólico del Estado, constituyen un potencial de mejora de la gestión ambiental, particularmente del problema relacionado con las emisiones contaminantes atmosféricas, pero sin duda, es deseable y necesario justificar el carácter del diseño y la aplicación de este tipo de medidas, en estudios que analicen, en un grado idóneo, los impactos de la aplicación de las mismas. Diversas

disciplinas y variadas herramientas están disponibles para tales fines, tal como se sugiere en las líneas siguientes.

#### **1.4 La evaluación ambiental como posibilidad metodológica para analizar el impacto de un programa de restricción vehicular**

El Análisis Costo Beneficio (ACB) es un método comparativo de evaluación agregada, que establece la conveniencia de una alternativa en relación con otras (BARBAROMERO y POMEROL, 1997; AZQUETA, 2002).

Como herramienta metodológica el ACB se adscribe al campo del análisis ambiental, el cual es bastante activo desde las perspectivas aportadas por la disciplina económica, en éstas se han propuesto diversas visiones para el análisis de valor de los impactos sobre los servicios o características de un ecosistema.

La economía ambiental, como subdisciplina especializada del campo económico, cuenta con una amplia trayectoria, pasando por los trabajos formales de teóricos celebres como Arthur Pigou, Ronald Coase, Stigler, entre muchos otros, parte de aceptar que la actividad económica, sin la cual los hombres tienen dificultades para subsistir, no puede desarrollarse sin producir cambios en el ambiente y que usualmente estos cambios son nocivos, razón por la cual la pregunta que se intenta abordar en rigor es: ¿Cuánto contaminar?, o de modo equivalente, ¿Cuánto conservar?

La economía ambiental busca alternativas viables de desarrollo y de bienestar, para ello propone instrumentos económicos, como impuestos y subsidios, que se reflejen en normas modificatorias de conductas individuales y sociales en favor de la preservación del ambiente, sin obstaculizar el proceso económico de producción-consumo de los agentes en conjunto, tales instrumentos se consideran mecanismos de gestión ambiental, y son alternos, a veces complementarios, de las prácticas tradicionales de comando y control aplicadas para la gestión ambiental de los entes territoriales (WATTENBACH, 2001; ROMERO, 1994; FIELD y FIELD, 2003).

Dada la complejidad de aplicar mecanismos económicos para inducir cambios en los niveles de emisiones atmosféricas contaminantes generadas por fuentes móviles, se usan instrumentos indirectos, de comando y control, los cuales tienen la probada

habilidad de requerir poca supervisión y fácil aplicación (ESKELAND y DEVARAJAN, 1996).

Uno de tales instrumentos indirectos son los programas de restricción al tráfico vehicular, con los cuales se podría intentar optimizar las relaciones entre las necesidades de movilización de la población y los niveles de emisiones contaminantes derivadas del uso de vehículos de motor para dicha movilización, no obstante, el resultado probable de la aplicación de este tipo de medidas puede y debe ser evaluado, a fin de obtener cierto grado de indicación de que los objetivos de optimización referidos se están cumpliendo.

En otras palabras, el proceso de corrección de comportamientos en exceso nocivos con el ambiente realizado por medio de aplicación de normas y fiscalización de su cumplimiento, requiere siempre de herramientas metodológicas o instrumentales que permitan al ejecutante, o sujeto activo, evaluar el resultado de las medidas adoptadas, de modo que se pueda garantizar la efectividad y eficiencia de su aplicación, para ello se dispone de potentes herramientas de análisis, como el ACB. (FIELD y FIELD, 2003; GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL, 2004).

El ACB es la formalización de la práctica cotidiana de sopesar las ventajas e inconvenientes de una determinada alternativa, excepto que, si la decisión tiene trascendencia, porque se trata de una elección que afecta el bienestar de una comunidad por ejemplo, ha de invertirse más esfuerzo en el ejercicio, traducido éste en mayor rigurosidad metodológica y especialmente ética.

Mediante el ACB se identifican y se valoran los costos y los beneficios de un proyecto, política o instrumento de regulación, seguidamente se evalúa mediante comparación de costos versus beneficios, de modo que la decisión final pueda establecerse sobre la base un criterio financiero de rentabilidad económica y social, en relación a otras alternativas.

Debe acotarse que el ACB es una herramienta susceptible de ser aplicada por una persona natural o jurídica interesada exclusivamente en evaluar alternativas que le generen una rentabilidad monetaria.

En el terreno ambiental, lo usual es que el ACB lo lleve a cabo una institución pública adscrita a la administración, que hace las veces de decisor final. Es recurrente, casi

obligado, que el ente público en cuestión adopte una perspectiva privada y trate de averiguar el impacto de lo que se propone hacer sobre su presupuesto, o el del sector privado de la economía. Si el foco de atención se centra en el impacto que tiene cada alternativa sobre la sociedad en general, puede hablarse de una perspectiva pública.

El objetivo del decisor institucional de esta naturaleza no es en esencia la rentabilidad financiera, es decir, aunque deseable, ésta no es la principal motivación de su intervención, ella obedece a la elevación del bienestar de las personas que representa, por ello el ACB busca descubrir la rentabilidad económica y social de las alternativas contempladas.

La herramienta de evaluación agregada ACB se aplica usualmente a dos tipos de alternativas:

- Inversiones: por ejemplo en la aplicación de un programa de conversión de consumo de combustibles fósiles a otros ambientalmente mas amigables.
- Políticas y/o regulaciones: por ejemplo, un programa de restricción vehicular que busca reducir la emisión de gases contaminantes provenientes del uso de combustibles fósiles tradicionales.

Es justo esta última perspectiva de utilidad del método la que es necesario resaltar, toda vez que en este estudio se busca evaluar y comparar dos escenarios diferenciados por las características que adopte, en la intensidad de restricción al flujo vehicular, el programa de pico y placa que se aplica actualmente en el municipio de Medellín, tal como se precisará líneas adelante.

Para estructurar la información relevante que pueda ayudar al decisor social en su tarea, puede seguirse una serie de etapas que permitan aplicar el ACB a un problema en particular, en general, en su orden tales etapas serán:

1. Identificar las alternativas relevantes
2. Diseñar un escenario de referencia o base
3. Identificar los principales costos y beneficios esperados del cambio
4. Valorar/cuantificar los costos y beneficios, en unidades monetarias de ser factible
5. Actualizar los valores y aplicación de un criterio de selección
6. Considerar el factor de riesgo
7. Realizar seguimiento y control del proceso

La variable ambiental aparece como relevante en el ACB, no sólo en tanto en cuando el problema que se trata de resolver encuadra en tal campo, sino también cuando las alternativas para solucionar un cierto problema presenten de manera inevitable impactos ambientales considerables.

El Análisis Costo Beneficio ACB, al establecer por evaluación comparada la conveniencia de una alternativa en relación con otra, se convierte en una herramienta útil para soportar los procesos de decisiones que implican considerar impactos socioeconómicos y ambientales medibles y susceptibles de ser agregados a través de un mismo indicador o numerario.

El ACB es una herramienta de análisis económico no libre de críticas severas por basarse en las premisas clásicas de la teoría económica, adicionalmente su implementación empírica resulta costosa, pero en últimas entraña un ejercicio bastante razonable y recurrente, que realizado con objetividad puede traducirse en una fuente potencial de aciertos en procesos decisorios.

Tales procesos cobran sentido cuando buscan elevar el nivel de bienestar de la población bajo el principio de sostenibilidad, y por tanto son múltiples las herramientas y enfoques complementarios de esta herramienta en particular. Uno de ellas es la valoración económica de impactos y recursos, un ejercicio que sólo es posible realizar cuando se adopta la postura ética antropocéntrica y se hace uso del instrumental teórico que ofrece la ciencia económica.

La realización de un ACB es una tarea costosa en términos de los recursos requeridos, lo cual explica su discreta aplicación. Se trata de una herramienta, aunque no sofisticada, si de costo prohibitivo, por demandar a menudo muchos recursos, especialmente informáticos, los cuales no siempre están disponibles.

En este punto vale la pena señalar el punto flaco del ACB, tal cual es la ausencia de consideración de la redistribución de los recursos. La equidad está fuera del alcance de este tipo de análisis.

Las precisiones conceptuales de la aplicación del método ACB, expuestas de una manera genérica en este aparte, cobran un sentido específico, práctico, en términos de la acotación del problema de estudio y la unidad de análisis que se realiza a continuación en el marco metodológico. En general, el término “costo” y “beneficio”

adoptan una definición específica, al igual que la transformación genérica del proceso que sigue el método sufre una adaptación para el caso de estudio, validada por fuentes debidamente referenciadas.

Además de aplicar el enfoque sugerido por el ACB, este estudio hace efectiva la aplicación de la dinámica de sistemas, como enfoque conceptual y metodológico para ilustrar y desarrollar la simulación y comprensión sistémica de la relación teórica que se presenta entre variables al estructurar un balance de tipo evaluativo fundamentado en los costos y los beneficios monetarios asociables a un programa de comando y control, diseñado para restringir la circulación de vehículos con el ánimo de mejorar el tráfico vehicular.

Este uso conjunto de dos enfoques metodológicos, el análisis costo-beneficio y la modelación bajo la dinámica de sistemas, deriva en un aporte novedoso y sugestivo de este estudio, lo cual queda en evidencia al entrar en el contexto empírico del mismo.

## 2. MARCO METODOLÓGICO

Esta tesis se propone contribuir con una disertación y una exposición evaluativa del programa pico y placa -PPK-, como un instrumento de comando y control que permite mejorar el tráfico vehicular, pero además podría contribuir a disminuir los niveles de emisiones contaminantes en la ciudad de Medellín.

Para lograr tal propósito se hace uso de una herramienta metodológica que permite evaluar el programa PPK, como un instrumento de comando y control, que restringe la circulación de los vehículos particulares y públicos (taxis) en dos periodos de tiempos (horas pico), asociados al último dígito de la placa en forma rotativa en el municipio de Medellín.

La herramienta en cuestión es la dinámica de sistemas (DS), la cual permite una técnica de modelación particular del problema estudiado, mostrando de manera simplificada una representación del fenómeno real observado, por medio de la cual se puede responder un interrogante haciendo uso de algoritmos numéricos, tratados por medio de una plataforma computacional (ANGEL, 2004).

La modelación presentada, como herramienta metodológica, que plantea escenarios, en los que se han combinado características asociables al problema de estudio observado, tipificadas por medio de variables a las que se les hace “actuar” una estructura evolutiva, de la cual se han obtenido conclusiones aplicables al campo de la gestión ambiental.

La dinámica de sistemas cuenta con trayectoria y aceptación en el medio científico. En efecto, la aplicación de la técnica de modelación de problemas se remonta a la década de los años 60, iniciando con los diagramas de flujo-nivel ideados por Forrester, técnica que había sido desarrollada originalmente para los estudios industriales y que luego se proyectó a problemas relacionados con sistemas urbanos, surgiendo de esta forma lo que denominó la *dinámica urbana* (ARACIL, 1998; ANGEL, 2004).

A finales de los 60 se produce el estudio que popularizó y difundió el uso de la DS, cual es el primer informe al Club de Roma sobre los límites al crecimiento, basado en un modelo en el que se simulaba la evolución de una serie de magnitudes agregadas a nivel mundial como son la población, los recursos y la contaminación ambiental, y la

forma previsible en que éstas incidirían en el fenómeno de interés (FORRESTER, 1971).

Los campos que utilizan la DS son muy variados. Durante sus más de 30 años de existencia se ha empleado para construir modelos de simulación informática en casi todas las ciencias. Es el caso de los sistemas ecológicos y medioambientales, en donde se han estudiado, tanto problemas de dinámica de poblaciones, como de difusión de la contaminación y el de los sistemas energéticos, en donde se ha empleado para definir estrategias de empleo de este tipo de recursos (ARACIL, 1995; GUTIÉRREZ y FEY, 1980).

El problema de estudio abordado se ha analizado mediante la dinámica de sistemas en estudios previos. Dos trabajos de investigación realizados por la autoridad ambiental del gobierno de Chile, CONAMA; consideran desde esta perspectiva el balance entre los beneficios y los costos asociados a la aplicación de un programa de restricción vehicular, a fin de obtener una medida de evaluación que sustentara la pertinencia de aplicar el programa. Cada una de estas categorías, beneficios y costos, está compuesta por una serie de dimensiones que contemplan los aspectos más representativos que explican la dinámica bajo la que opera la medida de restricción vehicular (CONAMA, 2007; CIFUENTES, 2007).

Se ha mencionado que existen plataformas computacionales para el tratamiento de las variables a las que se les hace “actuar” la estructura evolutiva del problema y las interrelaciones a que hay lugar entre éstas, una de tales es el software POWERSIM, el cual permite una aplicación que recrea rápida y eficazmente los escenarios de evaluación del programa objeto de análisis, para ello es necesario ingresar los valores de las variables que tipifican los beneficios y costos asociables con la aplicación del programa PPK.

La evaluación de la pertinencia de aplicar el programa PPK, con objetivos no sólo de movilidad, sino también ambientales, por la vía del balance entre costos y beneficios se realiza para dos escenarios diferentes, uno presente, en el que se consideran las condiciones de restricción vigentes, es decir, cada vehículo se restringe durante 4 horas/día de forma rotativa asociada al último dígito de la placa, y un escenario futuro, en el cual se presume que el programa se modifica para ampliar la restricción a 14 horas/día, bajo las mismas condiciones de rotación descritas. Éstas implican que cada vehículo se vea afectado una vez por semana por el programa PPK.



La propuesta conceptual se centra en los conceptos fundamentales de beneficio y costo, asociados a la aplicación de la medida.

Se entiende por beneficio la valoración económica que se asigna a las toneladas de emisiones contaminantes evitadas a partir de aplicar el PPK a los vehículos particulares responsables de tales emisiones.

Las etapas para obtener la medida del beneficio son en su orden:

1. Estimación del parque automotor a analizar
2. Estimación del nivel de actividad de dicho parque automotor objeto de restricción<sup>10</sup>.
3. Estimación de las emisiones del parque automotor objeto de restricción.
4. Estimación de la reducción de emisiones contaminantes debido a cambios en el nivel de actividad del parque automotor.
5. Valoración económica de las emisiones evitadas, es decir, el impacto de las medidas propuestas.

Se entiende por costos netos, la estimación del valor económico que resulta de la suma neta entre: (i) los “costos asociados”, son el monto de gasto en los que incurriría la población por la aplicación del PPK, si utilizan alguna de las principales modalidades de transporte como alternativa para realizar los viajes, y que de no mediar la restricción impuesta por el PPK realizaría en su vehículo particular, y (ii) los “ahorros asociados”, son el monto de gasto que se evita por consumo de combustible durante el tiempo en que rige el PPK.

La estimación de los costos asociados (CA) se ve afectada por la forma en que se relacionan y se valoran las variables a continuación descritas.

- Vehículos restringidos (VS): número de vehículos restringidos que sale de circulación por la aplicación de la medida, discriminado en las modalidades de vehículos que usan como alternativa de transporte alternativo taxi (A) y metro (B).

---

<sup>10</sup> Entendemos por nivel de actividad la cantidad de kilómetros que recorre el vehículo en una unidad de tiempo, Ej. Km/día, Km/año, etc.

- Valor del pasaje por viaje (P): valor del pasaje por viaje, discriminado en las modalidades alternativas de transporte alternativo taxi (A) y metro (B).
- Valor social del tiempo (VST): precio estimado del tiempo de una hora dedicada por una persona a la movilización discriminada en dos categorías, según utilice las modalidades alternativas de transporte alternativo taxi (A) y metro (B), este valor se contemplará como un valor que corresponde a una fracción (50%) del costo que tiene una hora laboral promedio, para cada tipo de categoría (AZQUETA, 2002).
- Tiempo de viaje extra (H): diferencia entre el tiempo promedio al viajar en automóvil particular y el tiempo al viajar en un transporte alternativo, discriminada en dos categorías, según utilice las modalidades alternativas de transporte alternativo taxi (A) y metro (B).
- Personas por vehículo (PV): número de personas promedio que viajan en un vehículo particular.
- Viajes por Personas (V): número de viajes por persona/día.
- Días de restricción (D): número de días/año en que estará vigente aproximadamente la aplicación de la medida de restricción.

**Tabla 3. Supuestos considerados para el cálculo de los costos asociados.**

Variable	Valor probable	Valor optimista	Fuente
Personas por vehículo (PS/veh)	1.4	1.4	AMVA, 2006
Viajes por persona (viajes/PS)	2.4	2.4	AMVA, 2006
Días de restricción (días/año)	242	242	
Pasaje por viaje A (\$)	5000	1180	
Pasaje por viaje B (\$)	1180	1180	Metro, 2007
Valor social del tiempo A (\$/h)	4800	4800	
Valor social del tiempo B (\$/h)	1600	1600	
Tiempo adicional A (h)	0	0.6	
Tiempo adicional B (h)	0.6	0.6	
% Vehículos A (% veh)	60	60	Anexo 1, 2008
% Vehículos B (% veh)	40	40	Anexo 1, 2008

Fuente: Elaboración propia con base en CONAMA, 2007 y CIFUENTES, 2007.

Es necesario aclarar las condiciones denominadas “valor probable” y “valor optimista”. Estos dos términos se asocian con dos categorías de transporte alternativo contempladas en el modelo, las cuales representan las opciones taxi y metro

respectivamente, como posibilidades de movilización de la población objeto de la medida de restricción vehicular. Sin embargo vale la pena aclarar que A y B en la condición “valor optimista” toman una única opción de movilización, el sistema metro, lo que origina que en esta opción, el valor del pasaje/viaje y el tiempo adicional sean iguales. El sondeo de opinión a 200 vehículos particulares realizado 27, 29 y 30 de marzo del 2008 (ver anexo 1), confirma que estos son efectivamente los medios alternos mas utilizados (CONAMA, 2007).

El costo asociado de la movilización se determina por medio de la siguiente expresión (CIFUENTES, 2007; CONAMA, 2007):

$$CA = VS \cdot (P + VST \cdot H) \cdot PV \cdot V \cdot D$$

La estimación de los ahorros asociados (AS) se ve afectada por la forma en que se relacionan y se valoran las variables a continuación descritas.

- Actividad vehicular (DV): cantidad de kilómetros/día recorridos por el vehículo.
- Precio del combustible (P): monto del valor de un galón de gasolina corriente, que varía por proyección año-año (UPME, 2006 y 2007).
- Rendimiento vehicular (R): kilómetros por galón de combustible que recorre el vehiculo, que tiene en cuenta la edad del vehiculo, para llevar a cabo una ponderación del parque automotor base para este estudio (CIFUENTES, 2007; EL TIEMPO, 2007).
- Días de restricción (D): número de días/año en que estará vigente aproximadamente la aplicación de la medida de restricción.

Los ahorros asociados (AS) están determinados por medio de la siguiente expresión (CIFUENTES, 2007; CONAMA, 2007):

$$AS = DV \cdot \frac{P}{R} \cdot D$$

**Tabla 4. Supuestos considerados para el cálculo de los ahorros asociados.**

<b>Variable</b>	<b>Valor Asumido</b>	<b>Fuente</b>
Actividad vehicular (km/día)	37,5	CIFUENTES, 2007
*Precio combustible (\$/gal)	6948	UPME, 2006-2007
Rendimiento Vehicular (km/gal)	36	FERNANDEZ, 2004
Días de restricción (días/año)	250	

Fuente: Elaboración propia con base en CONAMA, 2007 y CIFUENTES, 2007.

\*Varía año a año según proyección UPME 2006 y 2007.

La obtención de los costos asociados y de los ahorros asociados permite estimar los costos netos por medio de la siguiente expresión:

$$COSTOS\ NETOS = CA + AS^{11}$$

## **2.1 El modelo y su alcance**

Los problemas relacionados con la afectación de los ecosistemas a causa de las actividades de producción y consumo del hombre son complejos, por esta razón la incertidumbre estará latente, tal es el caso del impacto generado por las fuentes móviles, consideradas la principal causa de contaminación atmosférica en las ciudades, el impacto en la salud humana es uno de los costos mas visibles del creciente aumento de la congestión vehicular, razón por la cual algunas ciudades se han visto en la necesidad de aplicar medidas de comando y control, decretando restricciones organizadas a la circulación de vehículos, que además de paliar una parte del impacto ambiental negativo, buscan mejorar el tráfico vehicular y por esta vía la movilidad al interior de las urbes.

Estudiar y evaluar estos programas implica considerar la complejidad y la incertidumbre de sus resultados, ello no permite simplificar el fenómeno de interés per sé, pero el entendimiento de las características, las partes estructurantes y las relaciones de las partes del fenómeno usualmente obligan a hacer uso de modelaciones y mediciones, que estando sujetas a notables limitaciones interpretativas, sirven para recrear el fenómeno estudiado e inferir sobre algunas de sus propiedades, en intento por comprender mejor la dinámica que lo gobierna y proponer acciones de transformación o afectación del mismo a favor del hombre.

---

<sup>11</sup> Este modelo se encuentra aplicado y sustentado ampliamente en: Cifuentes, 2007.

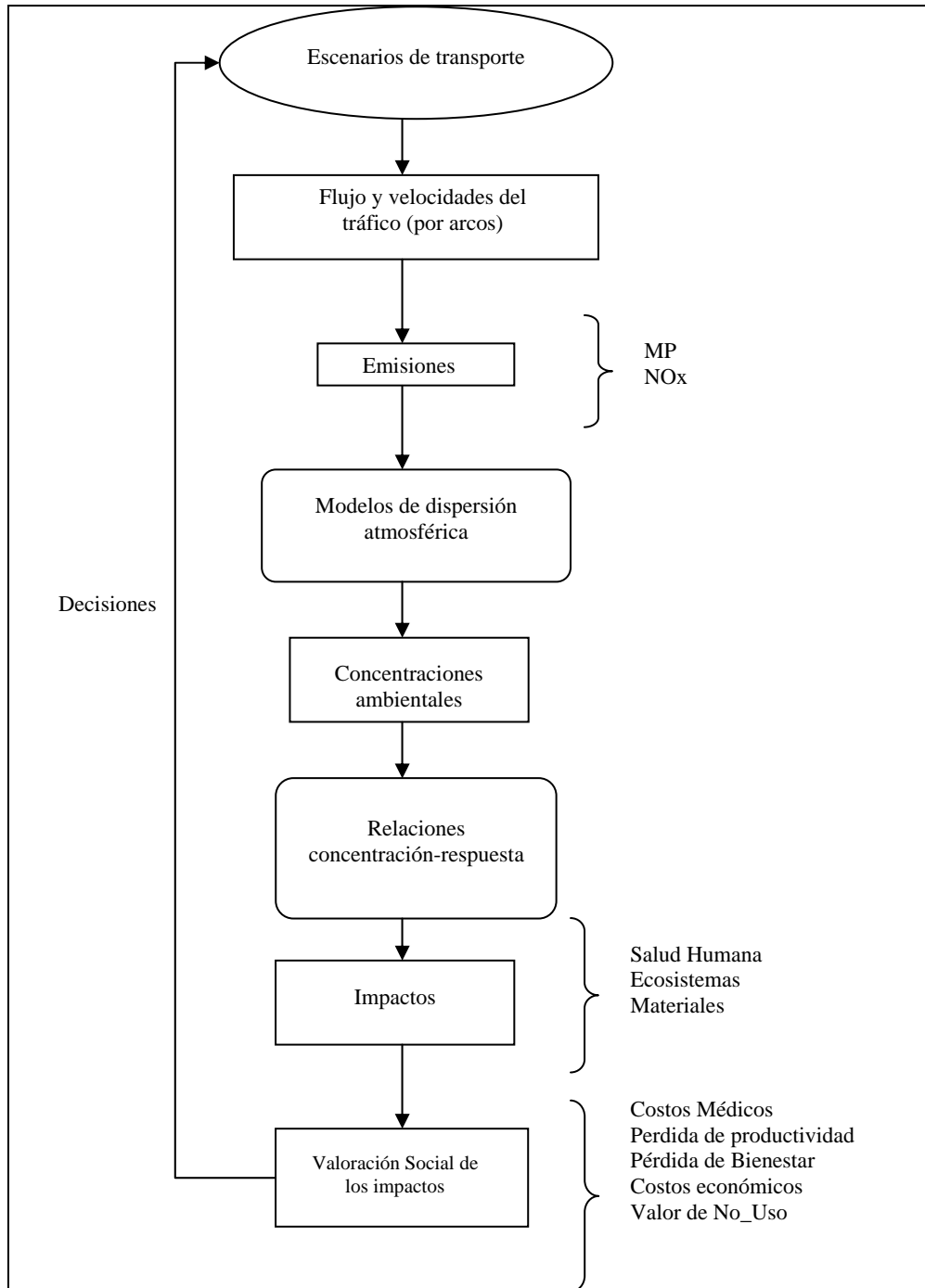
De modo consecuente, la no inclusión de todos los contaminantes atmosféricos de interés y de otras variables económicas y de movilidad incide en el resultado, desvirtuando las bondades potenciales de la medida, tales omisiones no son sistemáticas, responden a limitantes de recursos disponibles, especialmente en términos de información y tiempo, presentes en gran parte de los ejercicios académicos. De este modo el contrapeso de la parcialidad se compensa en la versatilidad por la que apuesta el presente análisis.

De igual manera se reconocen las limitantes derivadas de la incertidumbre que comporta el tipo de modelación utilizada, y se acepta la necesidad del debate ampliado entre los legos que estimen tener un rol en el escenario propuesto.

Para tratar de minimizar la incertidumbre asociada al problema de estudio y poder llevar a cabo la evaluación con los recursos disponibles, en el tiempo razonable, se hace necesario hacer uso de factores subjetivos y objetivos basados en experiencias similares o análogas que faciliten y validen la evaluación.

Este estudio hace uso de una modelación particular, cual es aquella que se deriva de la aplicación de un método de evaluación conocido como el Análisis Costo-Beneficio, descrito en el marco conceptual y contextual, no obstante, fue necesario hacer algunas simplificaciones a tal proceso clásico de modelación, que permitieran plantear dos escenarios sobre la aplicación de la medida de restricción vehicular PPK.

**Figura 4.** Esquema del proceso clásico de evaluación costo-beneficio.



Fuente: Elaboración propia con base en Cifuentes, 2007

Conviene, sin embargo advertir que el proceso clásico de modelación de las concentraciones de contaminantes atmosféricos; exige entre otras cosas, modelos de dispersión local, donde se muestren claramente cómo es la distribución en el territorio o área de estudio de los diferentes contaminantes y su función real de daño.

Tanto para el escenario presente como futuro se evalúa, en términos de un indicador económico, la eficiencia del programa, y a su vez se puede establecer un comparativo entre ambos escenarios, a fin de establecer cual es más pertinente en términos del enfoque adoptado.

Las simplificaciones referidas que se plantean en el modelo comprenden los siguientes aspectos:

- La modelación se realiza a nivel de área territorial y no a nivel de arcos viales.
- La modelación no contempla la dispersión de contaminantes atmosféricos, en su lugar utiliza los resultados de las emisiones para mostrar los efectos de la medida de comando y control PPK, planteando dos escenarios.
- La modelación no lleva a cabo un ejercicio de valoración social de los impactos, a cambio se hace uso de información secundaria tomada de estudios realizados en otros países, la cual indica de manera general, los impactos y una aproximación sobre los costos sociales que tiene la aplicación de la medida en cada uno de los dos escenarios considerados, controlando por las realidades y condiciones propias evidenciadas en la unidad de análisis.

Las simplificaciones planteadas, posibilitan la creación de un sistema ágil y económico de evaluación para la restricción vehicular. Con la posibilidad de mostrar diferentes escenarios y sus implicaciones. Sin pretender recrear la realidad de manera tan acertada como con los modelos clásicos, los resultados que arroja el modelo planteado son bastante robustos (CIFUENTES, 2007).

## **2.2 Caracterización de la unidad de análisis**

La unidad de análisis seleccionada para evaluar y comparar el resultado del cambio hipotético propuesto para el programa de restricción vehicular PPK es el municipio de Medellín, tal como se ha indicado en líneas anteriores, el cual hace parte de los diez municipios que conforman el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA).

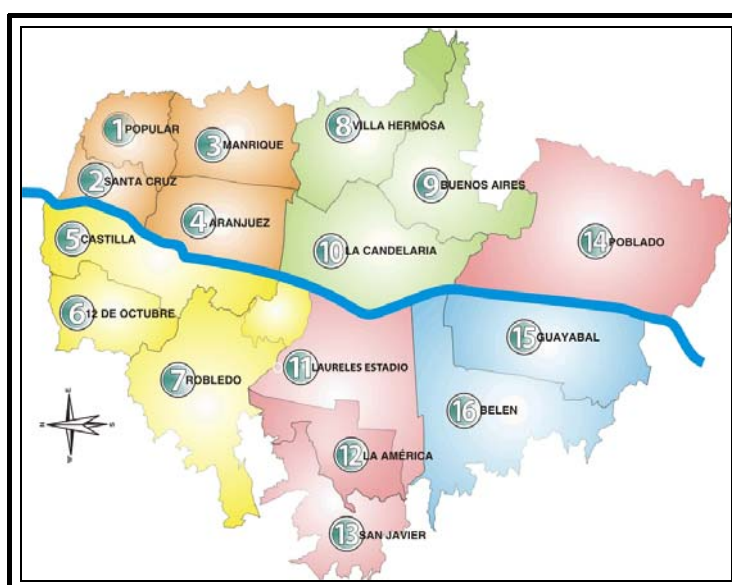
Parte de la justificación de elegir esta unidad de análisis, además de considerar los menores costos de realización del estudio en dicha zona, es que no todos los municipios que conforman el Área Metropolitana aplican el programa PPK, la aplicación de esta medida, es el producto de acuerdos o resoluciones particulares de cada alcalde de la región como es el caso de Envigado, Itaguí, Sabaneta, entre otros.

Es necesario aclarar que el parque automotor al cual hace referencia este estudio, está compuesto por una serie de categorías: autos, moto, bus, taxi, camiones y otros.

Este estudio toma como unidad muestral específica los autos o vehículos particulares sujetos a cumplir el PPK por resultar más sencillo el análisis y el tratamiento de la modelación de una única categoría relativamente homogénea.

El municipio de Medellín cuenta con una población aproximada de 2.250.000 habitantes agrupada en 16 comunas, como se indica en la Figura 5, y presenta una extensión total de 381 Km<sup>2</sup> de los cuales 105 Km<sup>2</sup> son urbanos (ALCALDIA DE MEDELLÍN, 2007; GOBANT, 2006).

**Figura 5.** Municipio de Medellín (distribución por comunas)



Fuente: Alcaldía de Medellín

El municipio analizado cuenta una longitud total de vías de 2.625 Km. A esta longitud de vías le corresponde un área de 21 Km<sup>2</sup>, que representan el 20% del total de su área urbana (AMVA, 2005). Esta área se encuentra distribuida así:

**Tabla 5. Distribución vial del municipio de Medellín, como proporción del área urbana.**

Medellín	Carretera	Arteria	Colectora	Servicio	Total
	0,20 %	3,45 %	4,97 %	12,37 %	20,99 %

Fuente: AMVA, 2005.



El Municipio cuenta con una Secretaria de Tránsito en la cual están matriculados 124.550 vehículos hasta el año 2002 (AMVA, 2005), sin embargo por ser Medellín el eje central del área Metropolitana, este número de vehículos no puede ser un referente del estudio, por esta razón el parque automotor base, será estimado a partir del total del parque automotor matriculado en las diferentes Secretarías de Tránsito que están autorizadas para este fin en el AMVA.

Este juicio fue emitido por los funcionarios de la Secretaria de Tránsito de Medellín (STTM), y corroborado por la información extraída de otros estudios, en los cuales se recomienda como no apropiado pretender igualar el número de vehículos matriculados en la STTM con los que circulan por las vías de esta ciudad.

Vale la pena resaltar que dentro de cualquier área territorial los factores que más influyen en la movilización son la población y la tasa de motorización, el aumento de esta última implica generalmente un mayor uso absoluto y relativo del automóvil (AMVA, 2005; O'RYAN, 1998).

Para ubicar y asociar espacialmente la distribución general del parque automotor que circula en el AMVA, es necesario considerar que el 79% de los autos se encuentran en el municipio de Medellín (26,3% en Poblado, 14% en Laureles, 12,6% en Belén), 9,4% en el municipio de Envigado y 11,5% en los ocho municipios restantes (AMVA, 2005); estos valores no se reflejan ni se corresponden con el número de vehículos matriculados en las secretarías de tránsito de los municipios, ya que algunas de éstas por su eficiencia o poca congestión realizan un mayor número de matrículas, excediendo las que por población corresponderían estrictamente a sus municipios, tal es el caso de Envigado que registra el 26% de los autos particulares del Valle de Aburrá, Itagüí el 23% y Bello el 37%, a diferencia de Medellín que sólo registra el 33% de los autos particulares del Valle de Aburrá (AMVA, 2006).

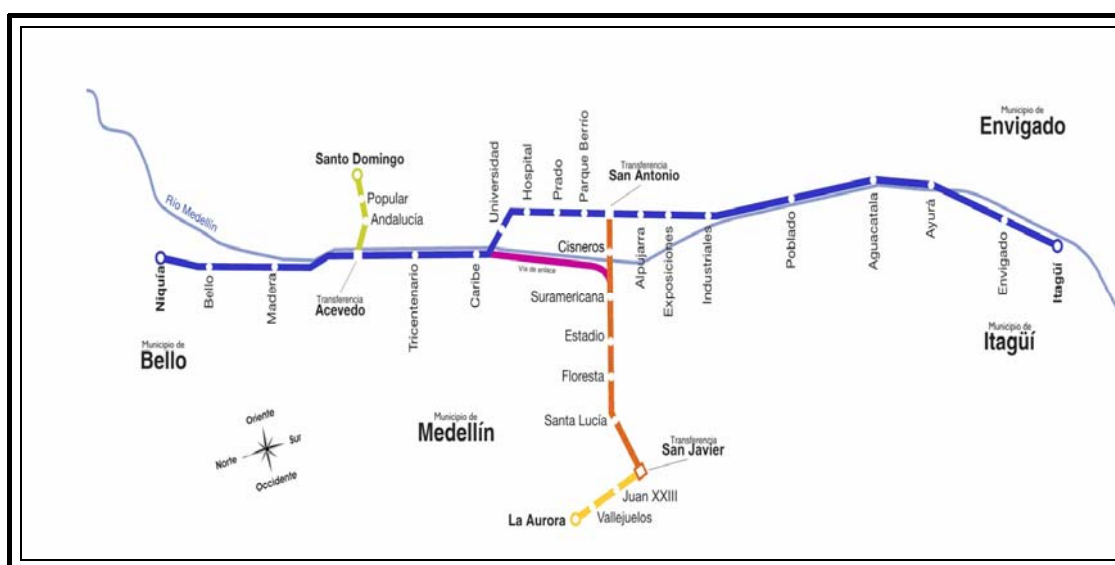
El AMVA cuenta, además de los autos particulares, con mecanismos para responder a la demanda estimada de 4'684.000 viajes/día (AMVA, 2006), con otros sistemas de transporte, entre los que se destacan el Sistema Masivo de Transporte Metro, el cual comenzó su operación a finales del año 1995, es el primer sistema masivo de transporte rápido en el AMVA.

Entre las características más relevantes se puede mencionar; que este sistema puede movilizar más de 1.000 personas en 6 vagones, su velocidad comercial es de 38 km/h

promedio, y opera con bajos impactos ambientales debido a que funciona con energía eléctrica.

El Metro cuenta actualmente con cinco líneas: la línea A que se orienta de Norte a Sur y viceversa, la línea B que va desde el centro de la ciudad hasta el barrio San Javier al occidente de Medellín, la línea C, que es el tramo de enlace entre las dos líneas antes mencionadas, la línea K, del Sistema Metrocable, que opera desde el barrio Acevedo hasta el barrio Santo Domingo Savio y por ultimo la línea J que opera desde la estación San Javier hasta el proyecto de vivienda de Pajarito, integrando los barrios de Juan XXIII, La Quebra, La Divisa, Santa Margarita, Olaya Herrera Uno y Dos, Fuente Clara, Blanquizal, La Pradera, Cucaracho, La Gabriela, el sector de Vallejuelos y el futuro sector de vivienda del Plan Parcial Pajarito – Ciudadela Nuevo Occidente (AMVA, 2006; AMVA, 2005).

**Figura 6.** Líneas de operación del sistema masivo de transporte Metro.



Fuente: Metro de Medellín, <http://www.metrodemedellin.org.co/portal/>

Según las directivas del Metro, la capacidad instalada del sistema permitiría cubrir con la flota de trenes actual, alrededor de 650.000 viajes/día, sin embargo, la falta de un sistema integrado de transporte con integración tarifaria, física y operacional entre los diferentes modos de transporte que operan en los diez municipios del AMVA, unido a la superposición de recorridos de los distintos modos de transporte disponibles con el Sistema Metro, hacen que una inversión tan cuantiosa esté subutilizada (AMVA,

2005). En el 2005 el Metro sólo cubriría 303.272 viajes/día laboral, lo que corresponde solo al 9% del total de viajes motorizados que se realizan en el AMVA (AMVA, 2006).

Complementario al sistema Metro funciona un sistema público de taxis y otro de buses, busetas y colectivos.

El sistema público de buses (bus, buseta, microbus) cuenta con 214 rutas que son cubiertas con aproximadamente 4.500 buses y 2.500 microbuses, de las 214 rutas 147 se encuentran en el municipio de Medellín, equivalentes al 69% del total de rutas de la región Metropolitana. Este sistema cubre 1.593.017 viajes/día, lo que corresponde al 50 % de los viajes motorizados que se realizan en esta área (AMVA, 2006).

El bus es el vehículo más común en el transporte urbano, funciona de manera económica y flexible, generando un número importante de puestos de trabajo, pero en materia de impacto ambiental negativo y deterioro de la movilidad se identifican como una fuente de agravamiento de ambos problemas. No obstante, el problema, no se le puede adjudicar a este sector, si tenemos en cuenta que el deterioro que causa las emisiones contaminantes de este tipo de transporte se debe, en general, a la baja calidad del combustible diesel que utilizan, en este sentido el problema se traslada a la política-país de inversiones en materia de fuentes energéticas, la cual hasta ahora no se ha ocupado de mejorar las características del combustible diesel ofertado en el AMVA.

El sistema de buses tiene la capacidad de circular por casi cualquier arteria vial y cuenta con la facilidad de ubicar sus paraderos en gran variedad de sitios (AMVA, 2006; AMVA, 2005), sin embargo las deficiencias de la infraestructura vial y las deficiencias en la integración con el Sistema Metro, hacen que el sistema de buses contribuyan de manera notable con el deterioro de la movilidad en la ciudad.

El taxi es un medio importante de movilidad de los habitantes, diariamente cubren 500.000 viajes en promedio, lo que corresponde aproximadamente al 11% de los viajes motorizados que se realizan en el Área (AMVA, 2006).

Este sistema cuenta hasta el año 2006 con 27.000 vehículos, agrupados en 43 empresas de las cuales 28 pertenecen al municipio de Medellín (AMVA, 2006; STTM, 2007).

La importancia que este sistema de transporte tiene en la movilidad del AMVA se evidencia mejor al considerar el resultado de las encuestas Origen-Destino del año 2000 y 2005, las cuales indican que los viajes que se realizan en esta zona están subvalorados, al no incluir los viajes que van al Metro y los que proceden de otras regiones del país, y que pasan por Medellín al llegar por cualquiera de los dos aeropuertos (Olaya Herrera y José María Córdova en Rionegro), terminales terrestres (Sur y Norte), además de las personas que desde días anteriores a la encuesta en hogares se hospedan y visitan la ciudad por motivos de negocio, salud, turismo y otros, durante varios días, las que no se incluyen en la encuesta domiciliaria por no ser residentes (AMVA, 2006; AMVA, 2005).

Se da a entender que el taxi representa el segundo modo de transporte, después del servicio de buses, superando al Metro, de ahí la importancia que este sistema tiene sobre la economía local; reflejándose no solo en los recaudos por la comercialización en el parque vehicular, sino también en la cantidad diaria de ingreso generado, así suponiendo 700 mil viajes/día por valor de 3.000 pesos/viaje, el recaudo es de 2.100 millones de pesos diarios (AMVA, 2005).

### **2.3 Dimensiones Consideradas**

El modelo considera el parque automotor compuesto por los automóviles particulares, los cuales componen el mayor dominio de aplicación de la medida de restricción vehicular PPK en la ciudad de Medellín. A su vez este parque automotor será clasificado de acuerdo al siguiente parámetro:

- Antigüedad del vehículo (rango de edad en el que se ubica).
- Categoría del vehículo (cilindraje del motor).

### **2.4 Contaminantes Estimados**

El modelo cuantificará contaminantes primarios, entendiéndose por estos aquellos que son descargados al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil (MMA, 2006). En este caso serán utilizados como parámetros de evaluación el PM, SOx y el NOx.

### 3. DEFINICIÓN DE ELEMENTOS DE ANALISIS

Para los fines del presente análisis es fundamental identificar la totalidad de las variables que permiten estructurar el modelo, correctamente y mostrar su relación entre estas.

Dos variables claves contempladas en el análisis son:

- El parque automotor objeto de la medida PPK. Distribuido según su antigüedad y la capacidad del motor.
- La actividad vehicular (Km/año) y las velocidades de tránsito por hora asociadas al parque automotor descrito anteriormente.

La información utilizada para este estudio, será obtenida de estudios realizados por el AMVA en convenio con otras instituciones y de las bases de datos de la Secretaría de Tránsito de Medellín. Los datos que sean necesarios y fundamentales para el ajuste del modelo, y no se encuentre referenciados o actualizados regionalmente, serán obtenidos de bibliografía y estudios nacionales o internaciones; teniendo siempre la precaución de ajustarlos si es posible, a nuestra realidad local.

Como se expuso al principio, en este estudio se plantea un escenario futuro, en los que se modela y evalúa una variación a la medida PPK, específicamente que esta sea extendida a todo un día.

#### 3.1 Parque Automotor

Para estimar cuál es el parque automotor actual diferenciado por antigüedad y capacidad del motor, se analizaron diferentes fuentes de información. Las fuentes y los datos obtenidos de ellas se seleccionaron teniendo siempre en cuenta la coherencia, actualización y fiabilidad. Los estudios, fuentes y datos que servirán como insumos para la elaboración de este estudio son:

- **AMVA, Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles. 2006**

La metodología general que utiliza este estudio para obtener la información referente al parque automotor es:

Hacer uso de la información de las siete secretarías de tránsito del AMVA autorizadas hasta el 2002 para registrar vehículos (Medellín, Envigado, Sabaneta, Itagüí, Bello, Girardota y Barbosa). Suponen que el total de vehículos que circulan el AMVA son los que se encuentran matriculados en estas secretarías de tránsito.

Cabe señalar que el estudio resalta las dificultades en la obtención de información primaria. Dejando muy claro que la información obtenida de las Secretarías de Tránsito del Área Metropolitana en la mayoría de los casos es incompleta o inexistente (AMVA INVENTARIO, 2006).

Este estudio se convierte en un referente importante para esta tesis porque, de manera análoga, se utilizarán algunos de sus resultados, análisis y suposiciones para distribuir el parque automotor según su antigüedad y la capacidad del motor. Los resultados obtenidos de esta fuente y que servirán para distribuir el parque automotor particular en este estudio son:

**Tabla 6. Distribución del parque automotor**

DESCRIPCIÓN	ANTIGÜEDAD			
	$X \leq 1970$	$1970 < X < 1979$	$1979 < X < 1986$	$X > 1986$
Particular	3.68 %	9.36 %	17.52 %	69.44 %
	CATEGORÍA O CAPACIDAD DEL VEHICULO (CAP)			
	$CAP < 1.4l$	$1.4l < CAP < 2.0l$	$CAP > 2.0l$	
Particular	41 %	29 %	30 %	

Fuente: Elaboración propia con base en AMVA, 2006.

### 3.2 Proyección en el tiempo del parque automotor

#### a) Autos Particulares

Definido el parque automotor base (año 2006) y teniendo claro el objetivo de bosquejar un escenario futuro, en los que se plantee y diseñen la modificación a la medida PPK; deberá detallarse una forma de recrear en el tiempo el comportamiento de este.

Diversos autores en economía del transporte, sugieren que son muchos los factores que influyen en el índice de motorización de una región o país, pero que estos se han estudiado ampliamente con la ayuda de modelos econométricos<sup>12</sup>. Dargay et al (1999)

<sup>12</sup> Entendemos por econometría, la aplicación de métodos estadísticos a datos y problemas económicos.

sugiere que el IPP (Producto interno bruto percapita) es un buen indicador de la entrada de vehículos nuevos (DARGAY, 1999). Por otra parte Goodwin et al (2003) agrega que también el precio de la gasolina y la calidad del tráfico influyen en la adquisición de nuevos vehículos (GOODWIN et al., 2003). Sin embargo, también a menudo la carencia de adecuadas series de datos que alimenten los modelos, conlleva a resultados engañosos y poco confiables (STORCHMANN, 2005 y GOODWIN, 1992).

Teniendo en cuenta nuestra realidad regional la cual presenta regularmente esta ausencia y/o falta de calidad en la información y lo que muy probablemente nos conduciría a resultados equivocados o poco precisos, proyectaremos en el tiempo el parque automotor de manera análoga a como se realizó en el Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles –ETROME– (AMVA INVENTARIO, 2006).

Este estudio utilizó como metodología, construir la línea de tendencia que mas se ajusta al crecimiento del parque automotor, con base en la información del periodo 1986- 2004<sup>13</sup>.

Se propone como planteamiento para este estudio, utilizar la información proporcionada por la Secretaría de Transporte y Tránsito de Medellín, AMVA y DANE para el periodo 1986-2006 y construir las líneas de tendencia que mas se ajusten al comportamiento; teniendo claro que existe una ruptura o inconsistencia claramente definida en el año 2002, año en el cual existe una incoherencia y cambio metodológico en el procesamiento de los datos, esto se evidencia en tratar de comparar los datos del año 2002 con los posteriores al año 2003.

Para la elaboración de este estudio se utiliza para proyectar en el tiempo una tendencia creciente, utilizando la ecuación de tendencia que proporcionen los datos más recientes que ofrece la STTM (2003-2006), por ser estos mas actualizados y metodologías mas precisas de la condición actual de parque automotor en la región.

La información utilizada se presenta en la siguiente Tabla

---

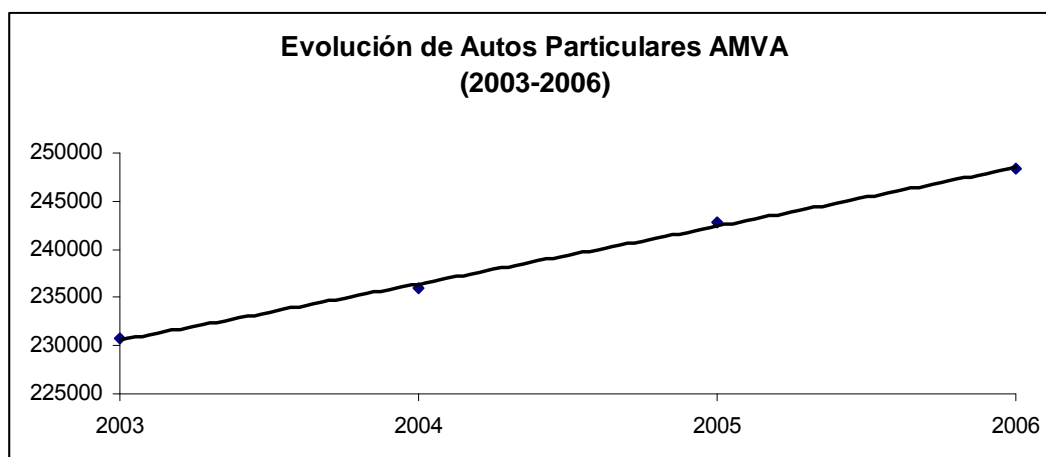
<sup>13</sup> Este año 2004 es un dato proyectado con la información obtenida del periodo 1986-2002, de las secretarías de tránsito del AMVA.

**Tabla 7. Evolución del parque automotor particular e índice de motorización.**

<b>Año</b>	<b>Autos Particulares</b>	<b>Habitantes</b>	<b>Índice de Motorización de Autos (veh/1000 hab)</b>
1986	93044	2192252	42,44
1987	99624	2263330	44,02
1988	105093	2334408	45,02
1989	108182	2405486	44,97
1992	114932	2618720	43,89
1993	120374	2689798	44,75
1995	148476	2751793	53,96
1996	164974	2801199	58,89
1997	177550	2851563	62,26
1998	215539	2902051	74,27
1999	228742	2952986	77,46
2000	241650	3004344	80,43
2001	244427	3056016	79,98
2002	252530	3108340	81,24
RANGO 2			
2003	230713	3160735	72,99
2004	235966	3213471	73,43
2005	242837	3306490	73,44
2006	248324	3361235	73,88

Fuente: Elaboración propia con base en STT (2007), AMVA (2006) y DANE (2007).

**Figura 7. Evolución del parque automotor particular.**



Fuente: Elaboración propia con base en STT (2007), AMVA (2006) y DANE (2007).

La evolución del parque automotor particular del AMVA, en este periodo (2003-2006) presenta una tendencia creciente y un porcentaje de crecimiento anual que oscila alrededor de 2.4 %. Para efectos de esta tesis se utilizará un crecimiento anual del 3%, este valor resulta ser de carácter conservador si se compara con el 7 % asumido por el inventario de emisiones (AMVA, 2006).



### 3.3 Actividad vehicular (Km/día)

#### a) Autos Particulares

Para determinar el nivel de actividad diario o anual de los vehículos particulares, por tipo y antigüedad del vehículo, se utilizará información secundaria de estudios extranjeros, nacionales y suposiciones propias que permitirá recrear de la manera mas acertada posible el escenario del AMVA.

Estimaciones de distancia anual recorrida en Santiago de Chile estimadas por Lepeley y Cifuentes (1999), determinaron que ésta se relaciona con la edad de los vehículos y que se encuentra aproximadamente entre 25.000 – 8000 Km/año, para vehículos de 0 y mayores a 25 años respectivamente (CIFUENTES, 2007). El AMVA (2006) supone que en promedio un vehiculo recorre aproximadamente 50 Km/día, lo que equivale aproximadamente a 18.250 Km/año (AMVA, 2006).

Otra opción de obtener de manera general e indirecta la actividad de los vehículos particulares en Colombia, es mirar cómo los principales comercializadores de autos del país ofrecen una garantía que oscila entre los 50.000 – 40.000 Km o 2 años, lo que ocurra primero. Este dato puede utilizarse para estimar aproximadamente que el recorrido anual de los vehículos particulares oscila entre 25.000 - 20.000 Km/año (EL TIEMPO, 2007).

Para efectos de este estudio y se asume una postura conservadora, tendiente a evitar o minimizar el riesgo de sobredimensionar los efectos de la medida PPK sobre la calidad ambiental, trataremos de utilizar valores menores a los referenciados anteriormente.

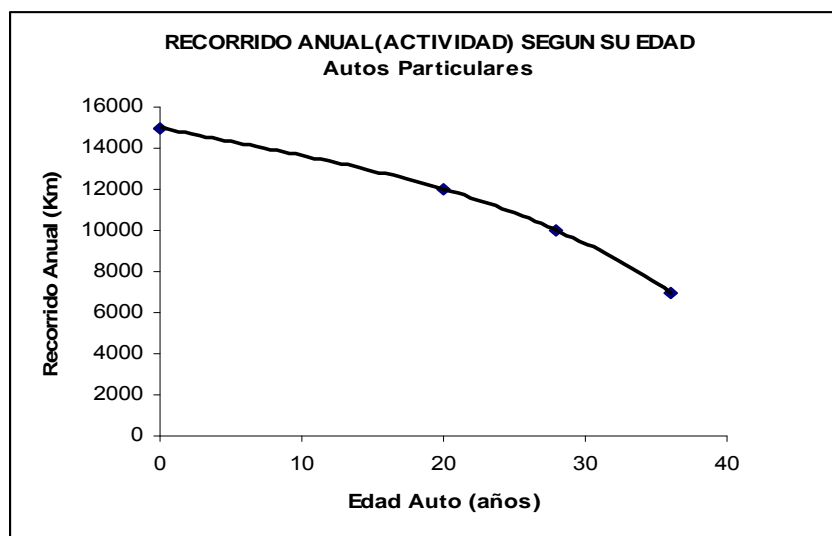
Las suposiciones utilizadas en esta tesis, se presentan en el siguiente cuadro y figura:

**Tabla 8. Nivel de actividad vehicular.**

AÑO BASE 2006		
Rango de Edad del Vehículo	Nivel de Actividad (Km/año)	Nivel de Actividad (Km/día)
$X \leq 1970$	7000	19
$1970 < X < 1979$	10000	27
$1979 < X < 1986$	12000	33
$X > 1986$	15000	41

Fuente: Elaboración propia con base en AMVA, 2005 y AMVA, 2006.

**Figura 8.** Nivel de actividad vehicular.



El modelo tendrá en cuenta que el cálculo de la actividad vehicular de los autos particulares contemple la distribución porcentual del parque automotor por su antigüedad y que esta solo se haga durante los días (lunes-viernes) que aplica la medida PPK.

### **3.4 Estimación de las emisiones del parque automotor objeto de la medida “pico y placa” (PPK)**

Tal como fue explicado anteriormente en el alcance del modelo, la determinación de emisiones y concentraciones en el aire de contaminantes, se lleva a cabo a través de procesos más detallados que ejecutan modelos de dispersión elaborados específicamente para una zona y un contaminante en particular.

Sin embargo por efectos prácticos y de alcance en este trabajo, se consideró una distribución uniforme del contaminante en el área de estudio (Medellín), obteniéndose de este modo valores promedio para los beneficios asociados a la medida PPK y sus modificaciones (escenario futuro) que son el objeto de este trabajo (CIFUENTES, 2007), (CONAMA, 2007).

Para calcular las emisiones del parque automotor objeto de la medida PPK es necesario ponderar los kilómetros horarios recorridos (Km/hora) por categoría, antigüedad y capacidad, por los factores de emisión en función de la velocidad por hora del día correspondiente (g/Km) (CIFUENTES, 2007). Para los contaminantes primarios el modelo utiliza los factores de emisión estimados por el programa –

ETROME- desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana en convenio con el AMVA, bajo el contrato 323 de 2005, y basado en la metodología europea de emisiones en caliente EMEP/CORINAIR, 2002 (AMVA, 2006).

La siguiente ecuación resume la metodología de un modelo simple de emisiones, propuesto por Cifuentes (2002) y (2007) que se utiliza en esta tesis para calcular las emisiones del parque automotor objeto de la medida PPK:

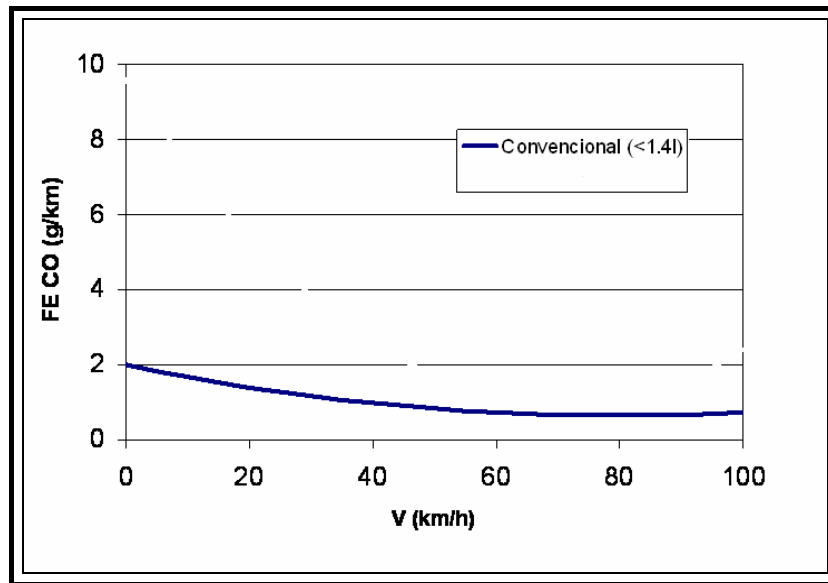
$$E_{año}{}_{ijkl} = \sum VKM_{jkl} \cdot FE(v(hora))_{ijkl}$$

- $E_{año}{}_{ijk}$  : Emisiones (g) del contaminante considerado  $i$ , para la categoría de vehículo  $j$ , para la potencia vehicular  $k$  por año y para antigüedad  $l$ .
- $VKM_{jk}$  : Kilómetros recorridos por año (Km/año) de la categoría de vehículo  $j$ , para la potencia vehicular  $k$  y para antigüedad  $l$ .
- $FE(v)_{ijkl}$  : Factor de emisión en función de la velocidad por hora del día (g/km) del contaminante  $i$ , para la categoría de vehículo  $j$ , para la potencia vehicular  $k$  y para antigüedad  $l$ .

### 3.5 Factores de emisión

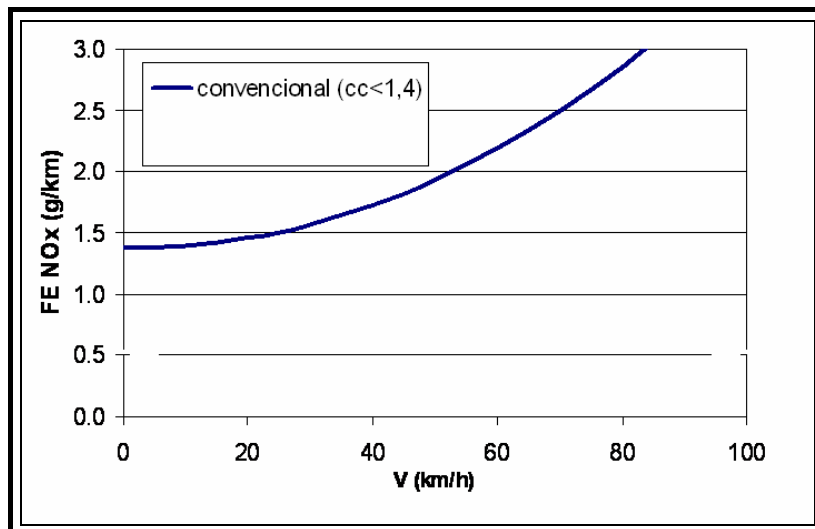
Los factores de emisión  $FE(v)_{ijkl}$  (g/km), también conocidos como tasa de emisión másica por unidad de desplazamiento, son dependientes de la velocidad de circulación del vehículo. Es por lo tanto fundamental considerar de la mejor forma este fenómeno en el cálculo de las emisiones, para tratar así de recrear de la mejor manera el escenario real (AMVA, 2006), (AMVA, 2005). A continuación se presenta a modo de ejemplo la variación de las emisiones de CO y NOx en función de la velocidad del vehículo:

**Figura 9.** Variación de emisión del CO vs velocidad.



Fuente: Cifuentes, 2002.

**Figura 10.** Variación de emisión del NOx vs velocidad.



Fuente: Cifuentes, 2002.

Si se analiza un poco las gráficas se observa cómo la relación que existe entre las emisiones de CO y la velocidad es inversa en el rango de análisis. Sin embargo para el NOx la relación es directa para el rango de análisis.

Para considerar de la mejor manera el fenómeno de variación de velocidad en el cálculo de emisiones atmosféricas, debería tenerse en cuenta perfiles de velocidad horarios para la totalidad de la malla vial, sin embargo y por no ser el objeto de esta tesis, se simplificara este fenómeno al manejo de dos velocidades promedios, las cuales serán una para el horario en el que opera el PPK y otra para el resto del día.

Los datos utilizados en el modelo de esta tesis, se obtienen de velocidades promedios calculadas por AMVA, 2006 en horas pico. En dicho trabajo la metodología básicamente consistió en equipar cuatro vehículos con GPS y hacerlos circular cada uno durante 8 horas diarias por cuatro días. Se instruyó a los conductores para el manejo del equipo y para anotar en una planilla, cuando se habían detenido por causas distintas a la congestión. Con estos datos se calculó la velocidad media de cada tramo en diferentes períodos. Para efectos de validación, se verificó que dicha velocidad no excediera los valores normales observados en otros estudios (AMVA, 2006).

Los resultados de este trabajo muestran como en promedio las velocidades en la mayor parte de las vías del AMVA en los horarios pico de la mañana (6 - 8) y tarde (17 - 19) se encuentra alrededor de 32 Km/h (AMVA, 2006); será entonces este el dato de velocidad que se utiliza en esta tesis para calcular las emisiones del parque automotor objeto de la medida PPK y en el horario que esta rige. Para el cálculo de emisiones en otra hora del día (fuera de horario de PPK), se utilizara la manejada por el AMVA, 2006 en el inventario de emisiones de fuentes móviles, 45 Km/h como la velocidad promedio (AMVA, 2006)<sup>14</sup>.

La metodología avalada por AMVA, 2006 realiza una clasificación por modelo y capacidad de motor de los vehículos y los ajusta a los establecidos por la CORINAIR, 2002. La clasificación y los respectivos factores de emisión utilizados en esta tesis se presentan en las siguientes tablas:

---

<sup>14</sup> Los valores de velocidad utilizados en esta tesis, son menores a 80 km/h y 60 km/h establecidos por la ley 1239 de 2008 y por tanto apropiados para realizar los cálculos acordes a la normatividad actual. Esta ley entre otras esta disponible en: <http://www.dmsjuridica.com/CODIGOS/LEGISLACION/LEYES/LEY%201239%20DE%202008.htm>, consultado septiembre 12 de 2008.

**Tabla 9. Clasificación de la antigüedad de parque automotor.**

DESCRIPCIÓN	ANTIGÜEDAD			
	Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
	$X \leq 1970$	$1970 < X < 1979$	$1979 < X < 1986$	$X > 1986$

**Tabla 10. Factores de emisión NO<sub>x</sub> para vehículos a gasolina (g/Km).**

Tipo de Vehículo	Capacidad	Factores de Emisión NO <sub>x</sub> (g/Km)
Modelo A	$CAP < 1.4l$	$1,173 + 0,0225V - 0,00014V^2$
	$1.4l < CAP < 2.0l$	$1,360 + 0,0217V - 0,00004V^2$
	$CAP > 2.0l$	$1,5 + 0,03V + 0,0001V^2$
Modelo B	$CAP < 1.4l$	$1,479 - 0,0037V + 0,00018V^2$
	$1.4l < CAP < 2.0l$	$1,663 - 0,0038V + 0,0002V^2$
	$CAP > 2.0l$	$1,87 - 0,0039V + 0,00022V^2$
Modelo C	$CAP < 1.4l$	$1,616 - 0,0084V + 0,00025V^2$
	$1.4l < CAP < 2.0l$	$1,29e^{0,0099V}$
	$CAP > 2.0l$	$2,784 - 0,0112V + 0,000294V^2$
Modelo D	$CAP < 1.4l$	$1,432 + 0,003V + 0,000097V^2$
	$1.4l < CAP < 2.0l$	$1,484 + 0,013V + 0,000074V^2$
	$CAP > 2.0l$	$2,427 - 0,014V + 0,000266V^2$

Fuente: AMVA, 2006

Para calcular los factores de emisión de TSP (Material particulado suspendido total) y de los SO<sub>x</sub> (Óxidos de azufre), el AMVA, 2006 tuvo en cuenta los promedios generales de velocidad de las vías y las dividió en las siguientes categorías:

**Tabla 11. Tipo de vías y sus velocidades promedio.**

Tipo de vía	Velocidad (km/h)	Correspondencia en zona de estudio
1	30	Calles del centro de Medellín
2	45	Calles fuera del centro
3	60	Avenidas regionales

Fuente: AMVA, 2006

En esta tesis se utilizará sólo las dos categorías de velocidad mencionadas anteriormente (32 y 45 Km/h), y que tiene relación con las velocidades promedios que se presentan en Medellín, en los horarios pico y los que se presentan fuera de este.

Los factores de emisión de TSP y SO<sub>x</sub> asociados a la velocidad de la vía, tipo de vehículo y capacidad de motor, se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 12. Factores de Emisión AMVA/CORINAIR empleados en el estudio.**

Velocidad de Vía (Km/h)	Tipo de Vehículo	Capacidad	Factores de Emisión (g/Km)	
			TSP	SO <sub>x</sub>
32	Tipo A	<i>CAP &lt; 1.4l</i>	0.06	0.015
		<i>1.4l &lt; CAP &lt; 2.0l</i>	0.08	0.018
		<i>CAP &gt; 2.0l</i>	0.10	0.022
	Tipo B	<i>CAP &lt; 1.4l</i>	0.06	0.013
		<i>1.4l &lt; CAP &lt; 2.0l</i>	0.08	0.016
		<i>CAP &gt; 2.0l</i>	0.10	0.017
	Tipo C	<i>CAP &lt; 1.4l</i>	0.06	0.012
		<i>1.4l &lt; CAP &lt; 2.0l</i>	0.08	0.014
		<i>CAP &gt; 2.0l</i>	0.10	0.018
	Tipo D	<i>CAP &lt; 1.4l</i>	0.06	0.010
		<i>1.4l &lt; CAP &lt; 2.0l</i>	0.08	0.013
		<i>CAP &gt; 2.0l</i>	0.10	0.015
45	Tipo A	<i>CAP &lt; 1.4l</i>	0.04	0.011
		<i>1.4l &lt; CAP &lt; 2.0l</i>	0.06	0.013
		<i>CAP &gt; 2.0l</i>	0.08	0.016
	Tipo B	<i>CAP &lt; 1.4l</i>	0.04	0.009
		<i>1.4l &lt; CAP &lt; 2.0l</i>	0.06	0.010
		<i>CAP &gt; 2.0l</i>	0.08	0.014
	Tipo C	<i>CAP &lt; 1.4l</i>	0.04	0.009
		<i>1.4l &lt; CAP &lt; 2.0l</i>	0.06	0.010
		<i>CAP &gt; 2.0l</i>	0.08	0.013
	Tipo D	<i>CAP &lt; 1.4l</i>	0.04	0.008
		<i>1.4l &lt; CAP &lt; 2.0l</i>	0.06	0.010
		<i>CAP &gt; 2.0l</i>	0.08	0.007

Fuente: AMVA, 2006

Cabe resaltar que las TSP no varían con el tipo de modelo para una capacidad dada, mientras que para el caso del SO<sub>x</sub> si lo hacen, disminuyendo en la medida que el vehículo es mas nuevo.

### 3.6 Valoración económica del impacto de las medidas en estudio

Cualquier medida de gestión de la calidad del aire y en este caso particular las que se enfocan al transporte, deben propender por mitigar las emisiones del sector permitiendo cambios positivos en la calidad del aire en la ciudad y por ende mejoras en la calidad de vida de la población. Estas mejoras o beneficios asociados a la aplicación de una medida económica o de comando y control como el PPK requieren ser valorados, si se pretende poder contar con indicadores de importancia en el bienestar social que permitan su comparación con otras medidas o con modificaciones futuras sobre si misma.

Esta valoración de la calidad del aire es compleja y requiere el análisis de un sin número de variables económicas, ambientales, de salud pública, técnicas, etc. Pese a esto, se pretende utilizar en este estudio algunas aproximaciones en la estimación de los beneficios sociales asociados a las reducciones en las emisiones de algunos contaminantes primarios (CIFUENTES, 2007), (CONAMA, 2007). Estos acercamientos a la estimación de los beneficios asociados si es el caso, de una medida de comando y control como el PPK, ayudarán a las autoridades encargadas a poder tomar mejores decisiones sobre ésta o sobre cualquier otra medida futura que se pretenda implementar.

Para calcular el beneficio social de las reducciones de emisiones, se tomó como referencia el estudio de Cifuentes (2007), en el que se actualizaron los beneficios sociales de reducir las emisiones de algunos contaminantes para Santiago de Chile (CIFUENTES, 2007).

Se pueden extraer de Cifuentes, (2007) claramente dos escenarios de funciones de daño y de valoración: el primero basado en estudios solamente Latinoamericanos (escenario LAC) y el segundo basado en estudios de Estados Unidos (escenario USA).

**Tabla 13. Valoración marginal de reducciones de emisiones contaminantes (US/ton reducida).**

Contaminante Primario	Año 2005	
	LAC	USA
NOx	1.726	25.889
SOx	4.635	69.519
TSP	66.165	992.481

Fuente: Cifuentes, 2007

Como puede observarse se presentan beneficios extremadamente altos en el escenario de USA, para corregir esta diferencia en el mismo estudio, Cifuentes (2007) utiliza un valor más cercano a la realidad Chilena, acordado y concertado con la autoridad ambiental CONAMA; los valores utilizados por este autor en su estudio se muestran en la siguiente tabla:



**Tabla 14. Valoración marginal de reducciones de emisiones contaminantes (US/ton reducida)**

Contaminante Primario	US/Ton
NO <sub>x</sub>	7.269
SO <sub>x</sub>	10.038
TSP	66.000

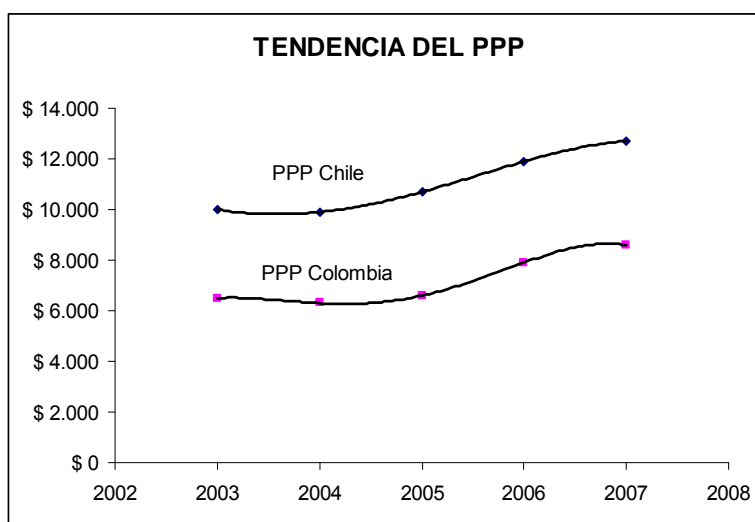
Fuente: Cifuentes, 2007

Conviene, sin embargo advertir que para la elaboración de este trabajo estos valores no se usan literalmente, dado que la realidad económica y social de Chile es diferente a la nuestra; por tanto los indicadores de importancia en el bienestar social también lo serán.

La valoración ambiental utiliza al dinero, como denominador común para reflejar los cambios heterogéneos de bienestar social, sin pretender que esta valoración monetaria sea una valoración de mercado<sup>15</sup>. Es por esto que para ajustar o proyectar en el tiempo las preferencias que expresan las modificaciones en el bienestar social (expresado en mejoras en la calidad del aire), diversos autores utilizan las variaciones del producto interno bruto per-capita (PPP) como mecanismo que mejor asemeja la tendencia de estos fenómenos de valoración ambiental<sup>16</sup>.

A continuación se muestra las tendencias del PPP de Chile y Colombia.

**Figura 11. PPP Chile vs PPP Colombia (2003-2007)**



Fuente: CIA World Factbook, 2007

<sup>15</sup> Los conceptos de Valoración Económica del Medio Ambiente, están claramente expuestos entre otras obras en, Field, 2003

<sup>16</sup> La utilización del PPP como mecanismo para ajustar o proyectar en el tiempo la Valoración económica del medio ambiente se utiliza y expone ampliamente entre otros estudios en, Cifuentes, 2007 y Dargay et al, 1999.

Si se analizan las gráficas se observa cómo los valores del PPP de Chile son mayores a los de Colombia, por esta razón no sería apropiado adoptar los datos presentados por Cifuentes, (2007). Como estrategia para utilizar estos datos de valoración económica de la calidad del aire, caso Chile, pero ajustados de manera aproximada a realidad económica Colombiana, se utilizará el promedio que surge de las diferencias porcentuales entre los PPP de cada país, dejando claro que esto simplemente es una aproximación y que no pretende ser una real valoración para el caso de Colombia; las diferencias porcentuales en el periodo 2003-2007 y su promedio se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 15. Variación porcentual PPP Chile vs PPP Colombia.**

<b>AÑO</b>	<b>CHILE</b>	<b>COLOMBIA</b>	<b>VARIACIÓN %</b>
2003	\$ 10.000	\$ 6.500	35
2004	\$ 9.900	\$ 6.300	36
2005	\$ 10.700	\$ 6.600	38
2006	\$ 11.900	\$ 7.900	34
2007	\$ 12.700	\$ 8.600	32
		<b>PROMEDIO</b>	<b>35</b>

Fuente: Elaboración propia con base en CIA World Factbook

A continuación se utilizará este valor de 35%, y un valor de US año 2006 de 2000 pesos, como ajuste en los datos de la valoración económica presentados para el caso Chileno. Los valores que serán los utilizados en esta tesis, se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 16. Valoración utilizada (US por tonelada reducida).**

<b>Contaminante Primario</b>	<b>CHILE</b>	<b>COLOMBIA</b>		<b>COLOMBIA</b>
	<b>US/Ton</b>	<b>US/Ton</b>		<b>\$/Ton</b>
TSP	66.000	<b>35%</b>	42.900	85'800.000
SOx	10.038		6.525	13'050.000
NOx	7.269		4.725	9'450.000

Fuente: Elaboración propia con base en Cifuentes, 2007

### **3.7 Proyección en el tiempo de la valoración**

Los valores de valoración utilizados en este trabajo fueron proyectados en el tiempo con un porcentaje del 4% anual de crecimiento, esta suposición acorde al comportamiento general creciente del PPP (pesos reales) de Colombia entre los años

(2003-2007). Los porcentajes anuales de crecimiento en el periodo mencionado se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 17. Variación porcentual PPP Colombia US/ mes (2003-2006).**

<b>AÑO</b>	<b>COLOMBIA</b>	<b>% Anual</b>
2003	6.500	
2004	6.300	-3,2
2005	6.600	4,5
2006	7.900	16,5
2007	8.600	8,1
<b>Promedio</b>		<b>6,5</b>

Fuente: Elaboración propia con base en CIA World Factbook

Si se analizan los crecimientos anuales del PPP Colombiano, observamos cómo el promedio de éstos está por encima del valor supuesto en este trabajo y cómo este último está incluso por debajo del menor valor positivo, teniendo siempre como precaución, no sobredimensionar ninguna de las variables consideradas en el modelo conceptual de evaluación de la medida PPK.

#### 4. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

El modelo planteado tiene la capacidad de formular escenarios para la evaluación de la medida de restricción vehicular PPK de manera ágil, los escenarios elegidos para realizar la evaluación comprenden dos dimensiones, una dimensión de costos netos, compuesta por dos categorías:

- Costos asociados (CA): Contempla dos condiciones de análisis, a) valor probable y b) valor optimista (véase Tabla 1 y las definiciones asociadas).
- Ahorros asociados (AS): Contempla dos condiciones de análisis, a) valor probable y b) valor optimista.

La segunda dimensión la constituyen los beneficios sociales. La matriz presentada a continuación refleja las dimensiones mencionadas, de suerte tal que la comparación entre los valores obtenidos cobra sentido en cada fila, puesto que se estaría comparando el impacto agregado de la medida PPK de la manera en que opera el programa actualmente y el resultado probable del escenario modificadorio propuesto.

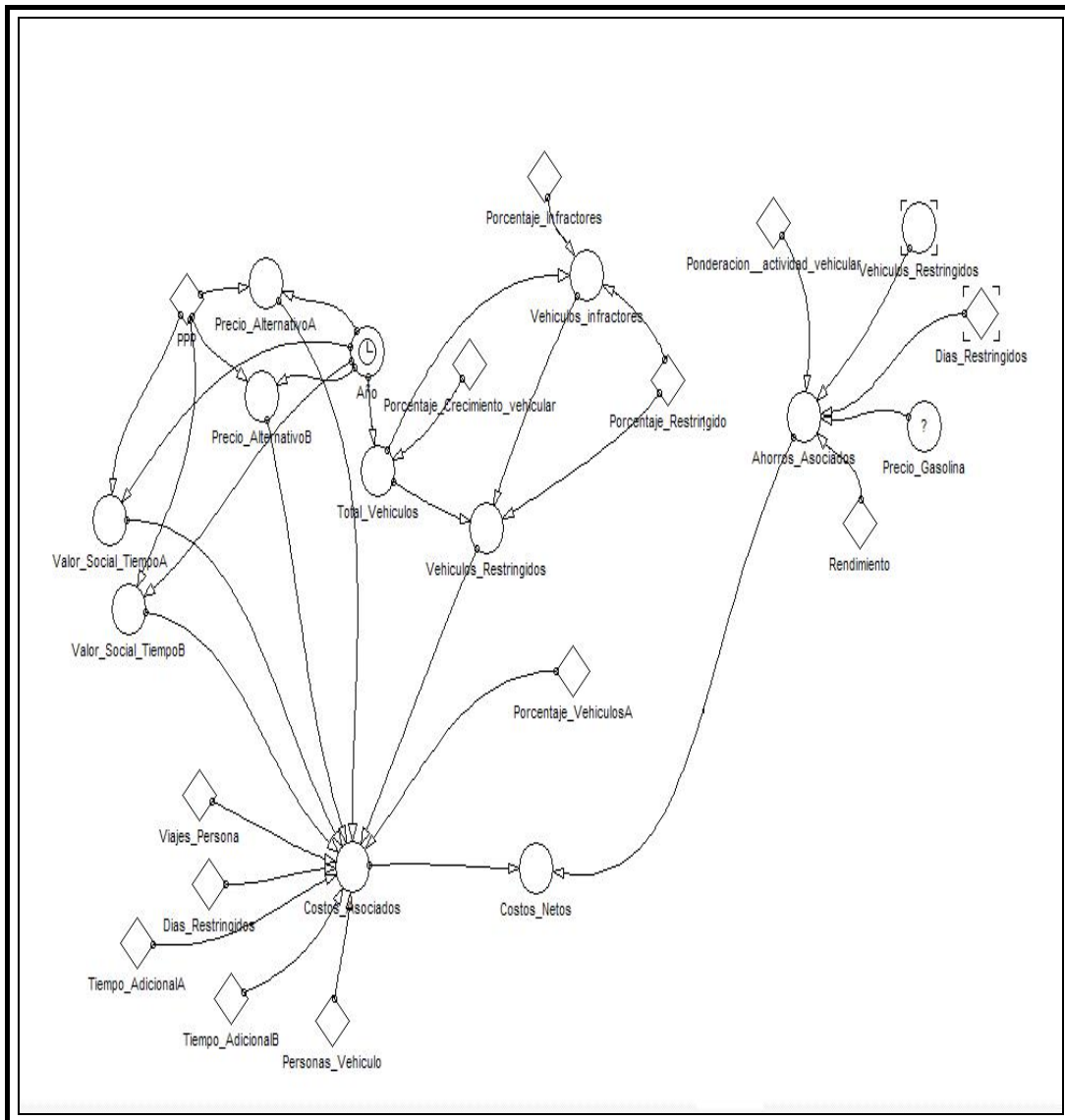
**Tabla 18. Esquema de comparación de escenarios.**

<b>DIMENSIONES</b>	<b>ESCENARIOS</b>			
<b>Dimensión</b>	Escenario Actual (A)		Escenario Futuro (M)	
Costos Netos (CA+AS) Valor probable	CA	AS	CA	AS
Costos Netos (CA+AS) Valor optimista	CA	AS	CA	AS
Beneficios Sociales	Beneficios sociales		Beneficios sociales	

El valor económico calculado para cada escenario permite evaluar el impacto de la medida en la reducción de emisiones (beneficios sociales) y costos netos de aplicación de la medida, en el escenario actual (A) y futuro (M) planteado. Los costos netos y beneficios sociales, se representan en miles de millones de pesos ( $1 \times 10^9$  pesos).

A continuación se presentan los esquemas de la modelación en Powersim de cada una de estas dimensiones, donde se muestran las constantes, variables y el contador<sup>17</sup> que se relacionan entre sí para recrear de manera aproximada el fenómeno de evaluación del impacto de la medida PPK, en el rango de tiempo comprendido entre el año 2006 y el 2015.

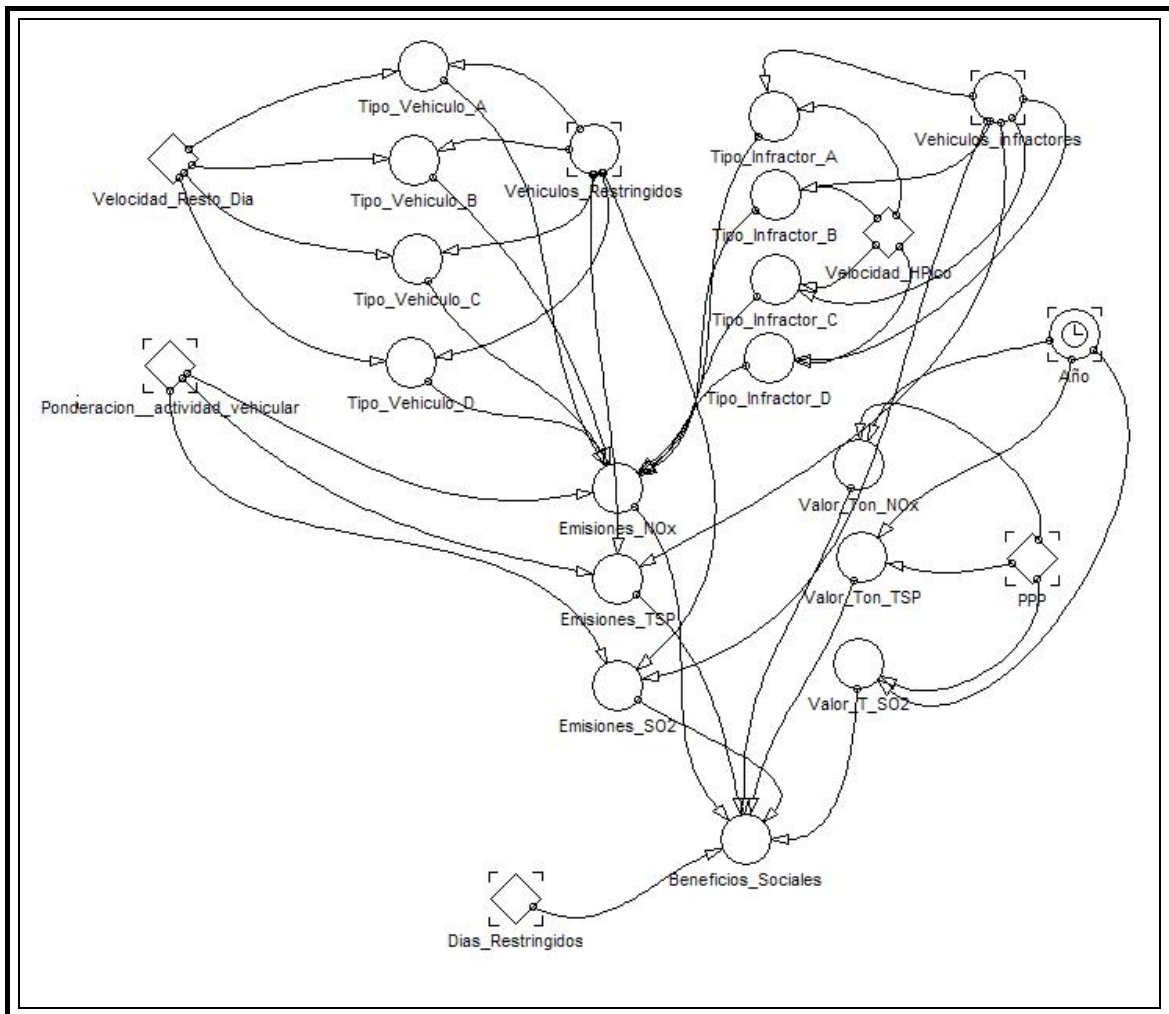
**Figura 12.** Esquema general de costos netos.



Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

<sup>17</sup> Constante son aquellos valores que se mantienen en el tiempo, en el modelo se ilustran con rombos; variables son aquellas que toman distintos valores en el tiempo, en el modelo se ilustran con círculos; contador, representa la variación anual de las variables en el modelo.

**Figura 13.** Esquema general de beneficios sociales.



Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

#### 4.1 Escenario actual (A)

Se hará referencia a este escenario de modelamiento a lo largo del presente trabajo, como aquel que recrea las condiciones con que opera el PPK del año 2006, ósea se restringe el 20% de los vehículos particulares durante las horas pico (06:30 horas a 08:30 y 17:30 a 19:30 horas), de forma rotativa con el último dígito de la placa. En este se pretende recrear el impacto del actual PPK sobre las emisiones contaminantes en el área de estudio, la principal característica es:

Se asumen que el 77.5 % del parque automotor restringido (20% del total de vehículos particulares), realiza sus viajes cotidianos en un horario en el que no aplica el PPK, a

este grupo se les denominará vehículos infractores, dado que el objeto es evaluar el impacto de la medida PPK sobre las emisiones contaminantes.

En otras palabras se asumirá que sólo el 22.5 % deja su vehículo en casa y realiza sus viajes en otro tipo de transporte, evitando así emitir gases contaminantes al ambiente (aporta beneficio social) e incurriendo en un costo neto por la aplicación de la medida PPK, tal como se detalló anteriormente en el marco metodológico.

Esta suposición se extrae de una encuesta de sondeo realizada el 27, 29 y 30 de marzo del 2008 a 200 conductores en la ciudad de Medellín, la pregunta consultada fue:

1. (Marque con X) ¿El día que le toca Pico y Pica usted regularmente deja su vehículo parqueado durante:

(a) Todo el día \_\_\_ (b) Sólo las 4 horas que dura la medida \_\_\_

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 19. Sondeo de opinión sobre el PPK**

RESPUESTA	COINCIDENCIAS	VALOR PORCENTUAL
Todo el día	45	22.5%
Solo las 4 horas que dura la medida	155	77.5%

Fuente: Elaboración propia con base en sondeo de opinión (ver anexo 1)

#### **4.2 Escenario futuro (M)**

Se hará referencia a este escenario de modelamiento a lo largo del presente trabajo, como aquel que recrea las condiciones modificatorias al programa PPK, en donde de manera similar al anterior escenario, se restringe el 20 % de los vehículos particulares, pero ya durante un periodo de 14 horas (06:30 horas a 20:30), e igual de forma rotativa con el último dígito de la placa. Su principal característica es:

Asume que 95 % del parque automotor restringido (20% del total de vehículos particulares), realiza sus viajes cotidianos en un transporte alternativo, evitando así emitir gases contaminantes al ambiente (aporta beneficio social) e incurriendo en un costo neto por la aplicación de la medida tal como se detalló anteriormente en el marco metodológico. De igual forma existirán vehículos infractores, en este escenario serán un 5% del total de vehículos restringidos y serán aquellos que infrinjan la norma o que realizan sus viajes en el horario que no opera la medida.



## **5. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el proceso de modelación bajo dinámica de sistemas y usando como herramienta computacional el software POWERSIM, bajo las observaciones descritas en los escenarios actual y modificadorio de la medida PPK, descritos anteriormente.

En la sección 5.1, se analizan y comparan los costos netos en sus dos condiciones, valor probable y valor optimista, también se analizan los beneficios sociales, expresados como una valoración de las toneladas de emisiones contaminantes evitadas, por la aplicación de la medida de restricción PPK en el escenario actual.

La sección 5.2, al igual que la anterior analiza y compara los costos netos en sus dos condiciones, valor probable y valor optimista, también analiza los beneficios sociales por la aplicación de la medida de restricción pero en el escenario futuro.

### **5.1 Resultados y análisis en el escenario actual (A)**

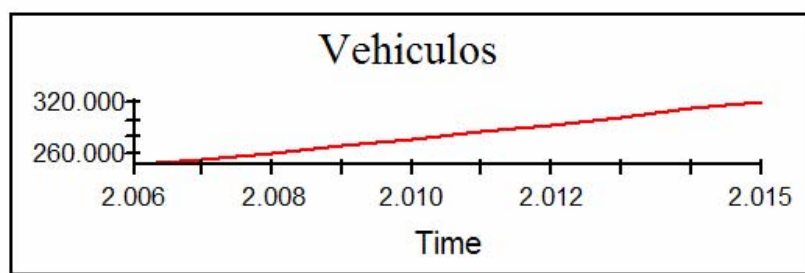
Los resultados y análisis que se presentan se asocian exclusivamente a la forma en que opera actualmente el programa PPK (sección 4.1), los resultados obtenidos en el proceso de modelación, se detallan a continuación:

#### **5.1.1 Parque automotor**

En la tabla 20 y su gráfico, se presenta el parque automotor particular que circula en el área de estudio en el periodo 2006-2015, que en el modelo planteado en este trabajo, son los sometidos a la medida de restricción PPK. Se destaca que este parque automotor es siempre creciente en el periodo de análisis y que será el mismo para las dos condiciones de costos netos planteadas en este escenario (ver capítulo 2).

**Tabla 20. Parque automotor particular AMVA (2006-2015).**

Time	Total_Vehiculos
2.006	248324
2.007	255774
2.008	263447
2.009	271350
2.010	279491
2.011	287876
2.012	296512
2.013	305407
2.014	314569
2.015	324006



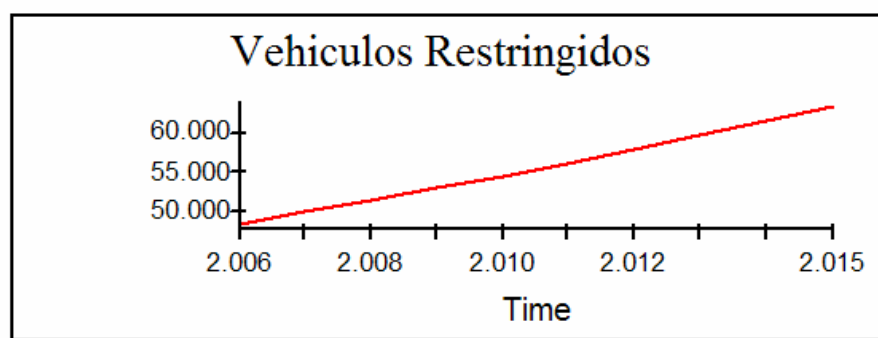
Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

### 5.1.2 Parque automotor restringido

En la tabla 21 y su gráfico, se presenta el parque automotor particular que se restringe por la aplicación de la medida PPK, 20% del total en el periodo 2006-2015. Se destaca que el parque automotor restringido es siempre creciente en el periodo de análisis y que será el mismo para las dos condiciones de costos netos planteadas en este escenario, adicionalmente se resalta que este parque automotor será el que genera el beneficio social, expresado éste como la valoración de las emisiones contaminantes (toneladas/año) evitadas.

**Tabla 21. Parque automotor particular restringido (2006-2015)**

Time	Vehiculos_Restringidos
2.006	47182
2.007	48597
2.008	50055
2.009	51557
2.010	53103
2.011	54696
2.012	56337
2.013	58027
2.014	59768
2.015	61561



Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

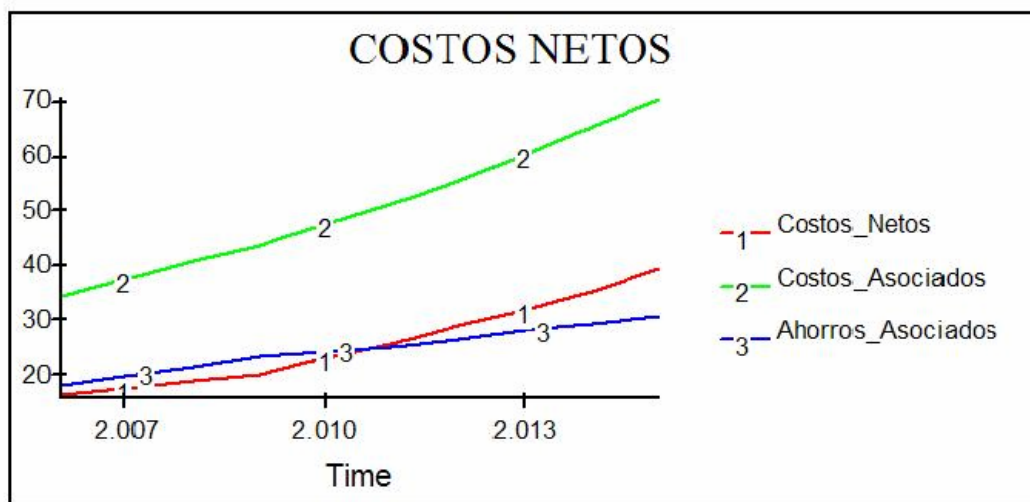
### 5.1.3 Costos netos condición mas probable

Los resultados que se presentan en esta sección se asocian a cálculos económicos de los costos netos en la condición mas probable (ver capítulo 2), y no se contemplan los costos y/o los ahorros indirectos a la aplicación de la medida PPK, como lo son, la disminución de la accidentalidad y del ruido, ahorros por el evitar el deterioro mas acelerado en flora, fauna e infraestructura, las posibles pérdidas económicas por menores actividades de producción consumo, entre otros, que en este caso no son objeto de tratamiento en este trabajo, y lo condicionan a ser un ejercicio preliminar susceptible de refinamiento.

En la tabla 22 y su gráfico, se presentan los costos asociados, los ahorros asociados y los costos netos en miles de millones de pesos (suma neta de los dos anteriores) en que incurre la población por la aplicación de la medida PPK.

**Tabla 22. Costos asociados, ahorros asociados y costos netos condición más probable (2006-2015). En miles de millones de pesos/año**

Time	Costos_Asociados	Ahorros_Asociados	Costos_Netos
2.006	35,04	18,45	16,59
2.007	37,89	20,19	17,71
2.008	40,98	21,91	19,07
2.009	44,32	23,77	20,55
2.010	47,93	24,62	23,31
2.011	51,84	25,71	26,13
2.012	56,06	26,93	29,13
2.013	60,63	28,30	32,33
2.014	65,57	29,69	35,88
2.015	70,92	30,93	39,98



Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

En este escenario los costos asociados en que incurre la población al aplicar la medida de restricción vehicular PPK son mayores que los ahorros asociados, por tanto, los costos netos son positivos, indicando que bajo la condición mas probable, la población no tiene incentivos económicos para aceptar la imposición de la medida PPK.

#### 5.1.4 Beneficios sociales condición mas probable

Los resultados que se presentan en esta sección corresponden a una aproximación de la valoración económica de evitar las emisiones de tres contaminantes atmosféricos (TSP, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), asociadas al parque automotor objeto de aplicación de la medida PPK.

En la tabla 23 se presentan las emisiones diarias evitadas por la aplicación de la medida PPK, expresadas en toneladas/día.

**Tabla 23. Toneladas de emisiones/día evitadas por PPK (2006-2015)**

Time	Emisiones_NOx	Emisiones_SO2	Emisiones_TSP
2.006	-1,79	-0,0237	-0,0592
2.007	-1,84	-0,0244	-0,061
2.008	-1,90	-0,0251	-0,0628
2.009	-1,95	-0,0259	-0,0647
2.010	-2,01	-0,0267	-0,0666
2.011	-2,07	-0,0275	-0,0686
2.012	-2,14	-0,0283	-0,0707
2.013	-2,20	-0,0291	-0,0728
2.014	-2,27	-0,03	-0,075
2.015	-2,33	-0,0309	-0,0773

Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

Los valores negativos obtenidos bajo este escenario y condición, indican que no se logran evitar las emisiones a causa de la aplicación de la medida PPK, dado que los vehículos restringidos por la medida, en su gran mayoría (77.5%), realizan sus recorridos rutinarios, sólo que éstos se hacen en el horario de no cobertura de la medida.

De manera similar en la tabla 24 se presentan los valores negativos que corresponden a los beneficios sociales que se obtienen por la aplicación de la medida PPK, expresados en miles de millones de pesos.

**Tabla 24. Beneficios sociales generados por la medida PPK (2006-2015). En miles de millones de pesos/año**

Time	Beneficios_Sociales
2.006	-5,39
2.007	-5,83
2.008	-6,31
2.009	-6,82
2.010	-7,38
2.011	-7,98
2.012	-8,63
2.013	-9,33
2.014	-10,10
2.015	-10,92

Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

De esta manera, se observa que la medida PPK bajo el escenario actual y condición más probable, genera costos netos positivos y genera beneficios sociales negativos, por tanto, la medida PPK es indeseable si se considera como un instrumento de comando y control ambiental; sin embargo esto no implica que la movilidad de buses y autos particulares en las horas que opera la medida no haya mejorado.

Es importante anotar que el modelo presentado en esta tesis no contemplo los impactos económicos y ambientales de las fracciones de tiempos ahorrados por mejoras en la movilidad en las horas pico.

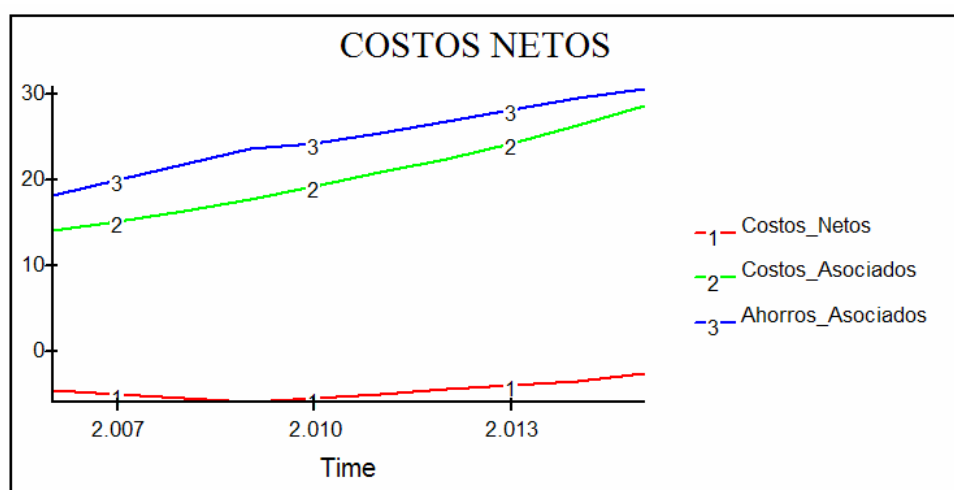
### **5.1.5 Costos netos condición optimista**

Los resultados que se presentan en esta sección tal y como se mencionó en el definición de los escenarios (ver tabla 18), de manera general contemplan las mismas características que la condición más probable, excepto que solo se contempla como opción de transporte alternativo para realizar los viajes el sistema masivo de transporte (véase Tabla 1 y las definiciones asociadas).

La tabla 25 y su grafico muestra los valores obtenidos en el proceso de modelación.

**Tabla 25. Costos asociados, ahorros asociados y costos netos condición optimista (2006-2015). En miles de millones de pesos/año**

Time	Costos_Asociados	Ahorros_Asociados	Costos_Netos
2.006	14,21	18,45	-4,24
2.007	15,37	20,19	-4,82
2.008	16,62	21,91	-5,29
2.009	17,98	23,77	-5,80
2.010	19,44	24,62	-5,18
2.011	21,03	25,71	-4,69
2.012	22,74	26,93	-4,19
2.013	24,59	28,30	-3,71
2.014	26,60	29,69	-3,09
2.015	28,76	30,93	-2,17



Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

Ahora los costos netos en que incurre la población con la aplicación de la medida PPK, presentan valores negativos, lo que se interpreta como un beneficio económico, pero que en todo caso no alcanzan a compensar los beneficios sociales negativos presentados en la Tabla 24, por tanto, la restricción aun resulta indeseable si se considera como un instrumento de comando y control ambiental bajo el escenario actual.

## 5.2 Resultados y análisis en el escenario futuro (M)

Los resultados y análisis que se presentan en esta sección se asocian a un planteamiento modificador de la medida de restricción vehicular PPK (sección 4.2),

que pretende evaluar el impacto ambiental y económico del cambio propuesto. Los resultados obtenidos en el proceso de modelación, se detallan a continuación.

### **5.2.1 Parque automotor**

Los resultados y análisis son idénticos a los que se presentan en escenario actual (ver tabla 20).

### **5.2.2 Parque automotor restringido**

Los resultados y análisis son idénticos a los que se presentan en escenario actual (ver tabla 21).

### **5.2.3 Costos netos condición mas probable**

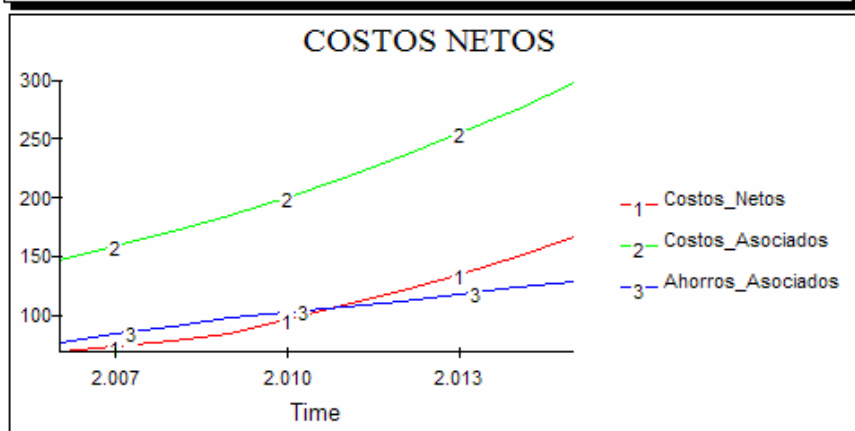
Al igual que en escenario anterior los resultados que se presentan en esta sección se asocian a cálculos económicos de los costos netos en la condición mas probable (véase Tabla 1 y las definiciones asociadas), y no se contemplan los costos y ahorros indirectos a la aplicación de la medida de restricción vehicular modificada (periodo de 14 horas), como lo son, la disminución de la accidentalidad, el ruido, ahorros por el evitar el deterioro acelerado en flora, fauna e infraestructura, las posibles pérdidas económicas por menores actividades de producción consumo, entre otros, que en este caso no son objeto de tratamiento en este trabajo, y lo condicionan a ser un ejercicio preliminar susceptible de ajustar.

En la tabla 26 y su gráfico, se presentan los costos asociados, los ahorros asociados y los costos netos en miles de millones de pesos (suma neta de los dos anteriores) en que incurre la población por la aplicación de la medida de restricción vehicular modificada, bajo la condición mas probable.



**Tabla 26. Costos asociados, ahorros asociados y costos netos condición más probable (2006-2015). En miles de millones de pesos/año**

Time	Costos Asociados	Ahorros Asociados	Costos Netos
2.006	147,93	77,89	70,05
2.007	159,99	85,23	74,76
2.008	173,03	92,53	80,50
2.009	187,13	100,38	86,75
2.010	202,38	103,97	98,41
2.011	218,88	108,57	110,31
2.012	236,71	113,72	122,99
2.013	256,01	119,49	136,51
2.014	276,87	125,36	151,51
2.015	299,44	130,61	168,82



Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

Los costos asociados en que incurre la población son mayores que los ahorros asociados, por tanto, los costos netos positivos indican que en este escenario y bajo la condición más probable, la medida modificatoria de restricción vehicular no genera incentivos económicos para su aceptación por parte de la población objeto de aplicación de la medida.

#### 5.2.4 Beneficios sociales

Los resultados que se presentan en esta sección al igual que en el escenario anterior corresponden a una aproximación de la valoración económica que tiene evitar las emisiones de tres contaminantes atmosféricos (TSP, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), asociadas al parque automotor objeto de aplicación de la medida de restricción vehicular modificada.

En la tabla 27 se presentan las emisiones diarias evitadas por la aplicación de la medida de restricción modificada, expresadas en toneladas/día.

**Tabla 27. Toneladas de emisiones/día evitadas por restricción vehicular modificada (2006-2015)**

Time	Emisiones_NOx	Emisiones_SO2	Emisiones_TSP
2.006	3,169	0,039	0,097
2.007	3,264	0,040	0,100
2.008	3,362	0,041	0,103
2.009	3,462	0,042	0,106
2.010	3,566	0,044	0,109
2.011	3,673	0,045	0,112
2.012	3,783	0,046	0,116
2.013	3,897	0,048	0,119
2.014	4,014	0,049	0,123
2.015	4,134	0,051	0,126

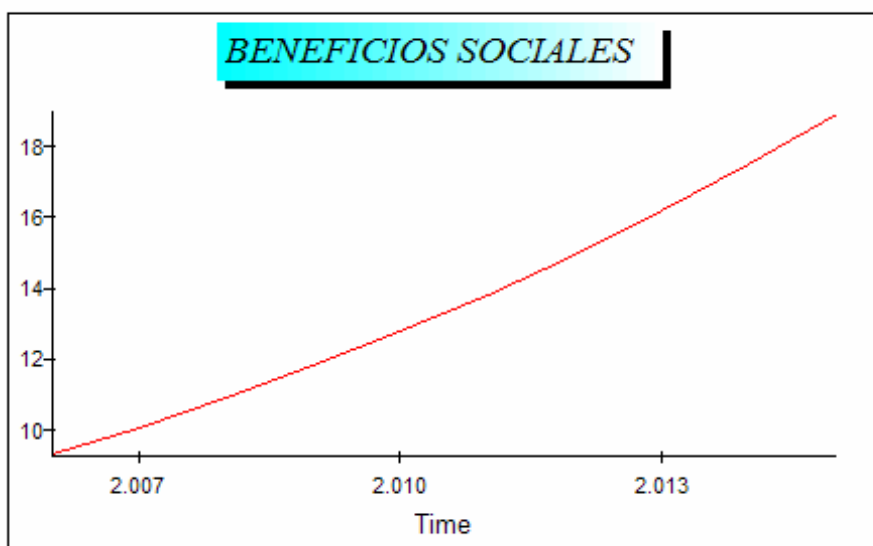
Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

Los valores positivos obtenidos bajo este escenario y condición, se interpretan como las emisiones que se logran evitar por consecuencia de la aplicación de la medida de restricción vehicular modificada; teniendo en cuenta que los vehículos restringidos por la medida (95 % del total restringido) bajo esta condición, no realizarían sus recorridos diarios en sus vehículos particulares.

Con base en los resultados presentados en la tabla anterior presentamos la valoración económica aproximada de las toneladas evitadas de estos contaminantes, a causa de la aplicación de la medida de restricción vehicular modificada, expresados en miles de millones de pesos anuales. Los resultados se presentan en la tabla 28 y su gráfico.

**Tabla 28. Beneficios sociales generados por la medida de restricción vehicular modificada (2006-2015). En miles de millones de pesos/año**

Time	Beneficios Sociales
2.006	9,38
2.007	10,14
2.008	10,97
2.009	11,87
2.010	12,83
2.011	13,88
2.012	15,01
2.013	16,23
2.014	17,56
2.015	18,99



Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

Las cifras de valoración obtenidas representan los beneficios sociales que arroja la aplicación de la medida de restricción vehicular modificada (ampliada a un periodo de 14 horas).

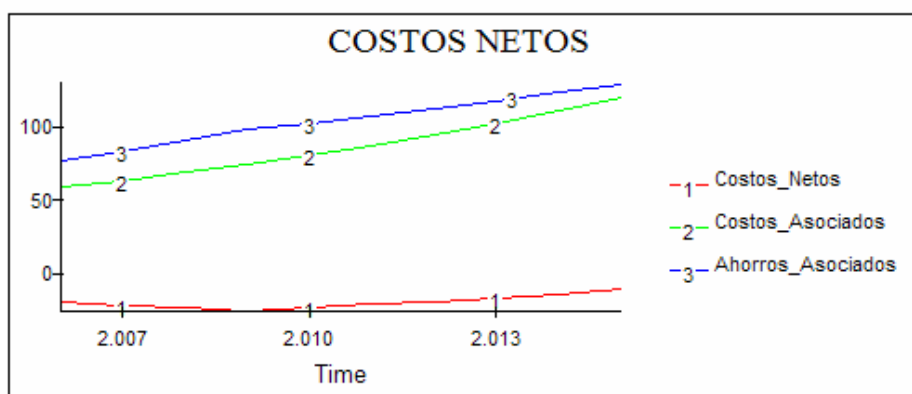
### **5.2.5 Costos netos condición optimista**

Los resultados que se presentan en esta sección tal y como se mencionó en la definición de escenarios (ver tabla 18), de manera general contemplan las mismas características que la condición más probable, excepto que solo se contempla como opción de transporte alternativo para realizar los viajes, el sistema masivo de

transporte (véase Tabla 1 y las definiciones asociadas). La Tabla 29 y su gráfico muestran los valores obtenidos en el proceso de modelación.

**Tabla 29. Costos asociados, ahorros asociados y costos netos condición optimista (2006-2015). En miles de millones de pesos/año**

Time	Costos Asociados	Ahorros Asociados	Costos Netos
2.006	60,00	77,89	-17,89
2.007	64,89	85,23	-20,34
2.008	70,18	92,53	-22,34
2.009	75,90	100,38	-24,48
2.010	82,09	103,97	-21,88
2.011	88,78	108,57	-19,79
2.012	96,01	113,72	-17,71
2.013	103,84	119,49	-15,66
2.014	112,30	125,36	-13,07
2.015	121,45	130,61	-9,16



Fuente: Elaboración propia con base en modelación bajo powersim.

El proceso de simulación de los costos netos de la aplicación de la medida PPK, presenta valores negativos, lo que se interpreta como un beneficio económico, el cual se suma a los beneficios sociales ilustrados en la Tabla 28, e indica un incentivo para la aplicación de la medida, por tanto, la restricción es deseable si se considera como un instrumento de comando y control ambiental en este escenario particular.

## 6. CONCLUSIONES

El resultado presentado dista de ser un balance completo, las limitantes reveladas pretenden instar a la realización de trabajos complementarios, de mayor completitud y/o de mejor ajuste de los parámetros y de la estructura del modelo evaluativo usado, que por contraste permitan identificar una solución óptima a un problema que tendrá vigencia y afecta de manera directa el bienestar de la población.

El trabajo investigativo da cuenta de las ventajas económicas en la potencialización del uso de los sistemas masivos de transporte por parte de la población objeto de las medidas de restricción vehicular, en cualquiera de los dos escenarios planteados. Dicha ventaja se asocia a los ahorros en que incurre la población que los utiliza cuando esta sujeta a la medida, estos se evidencian básicamente en el costo del combustible evitado. Bajo esta consideración se promueve una disminución en la demanda diaria de movilidad en vehículos particulares, lo que conlleva a una directa disminución en los niveles de consumo de combustible, y por ende a una menor cantidad de emisiones contaminantes a la atmósfera que afecta directamente la salud de la población de la región objeto de estudio.

En el caso contrario y en donde la condición es que la población objeto de la medida de restricción tenga dos opciones (taxi y metro) de transporte alternativo (condición mas probable) refleja que los costos asociados generados por la aplicación de la medida son siempre superiores a los ahorros asociados que se obtienen, lo que se traduce en costos netos positivos y muy seguramente poca aceptabilidad en la aplicación de la medida por parte de la población objeto.

De acuerdo al escenario actual (A) de aplicación de la medida de restricción vehicular PPK planteado en este trabajo, no se tienen beneficios sociales o ambientales expresados en emisiones contaminantes evitadas, ya que la forma en que opera la medida, permite a los vehículos restringidos, realizar sus viajes cotidianos en una franja horaria donde no aplica la medida. En otras palabras, el ejercicio de simulación del escenario actual indica que la medida de restricción PPK, considerada como instrumento de comando y control ambiental no genera incentivos económicos y sociales que sustenten su aplicación, sin embargo es sabido que la medida ha incidido

positivamente en el problema de la movilidad urbana y quedara como futura pregunta de investigación ¿cual es la disminución en los tiempos de viajes, durante las franjas horarias que opera el PPK?

Los resultados indican que el escenario futuro (M) presenta beneficios sociales (emisiones contaminantes evitadas) significativos, que de ser acompañados por los resultados previstos en los costos netos bajo la utilización intensiva de los transportes masivos como alternativas de movilidad, en respuesta a la aplicación de la medida de restricción vehicular, hacen que esta se convierta un mecanismo de gestión ambiental, para el recurso aire.

Evaluar una medida de restricción vehicular en nuestro medio presenta serias dificultades dado la falta y confiabilidad de la información disponible. Por ejemplo, no se tiene certeza y detalles técnicos del parque automotor que circula por el AMVA, ya que la falta de centralización y/o administración de la información de las diferentes secretarías de tránsito del AMVA hace que seguramente la cifra del parque automotor particular esté subestimada. La falta de información técnico-mecánica relativa a la eficiencia de los motores y tipologías de combustibles usados, impiden una simulación mas refinada, en la que se pueda evaluar el impacto de la medida de restricción vehicular, considerando en detalle las eficiencias de los motores, dado que no será equitativo aplicar de manera generalizada una medida que no contemple que un vehiculo con edad superior a diez años es como mínimo diez veces mas contaminante que uno nuevo (Tal como se referenció en el marco teórico).

### **Observaciones generales**

El trabajo de investigación realizado ha presentado la metodología y los resultados del análisis costo-beneficio del estudio del impacto de la medida de restricción vehicular PPK como mecanismo para el control de las emisiones del parque automotor en la ciudad de Medellín.

Es claro que el modelo desarrollado y los escenarios desarrollados en este trabajo representan un aporte en el perfeccionamiento del análisis costo-beneficio como herramienta de evaluación la eficiencia de medidas regulatorias como el PPK. No obstante, aun existen una serie de mejoras, tanto metodológicas como de programación, posibles de desarrollar en un modelo futuro. Se pueden resumir en los siguientes ítems:

- Teniendo en cuenta las ventajas y disponibilidad del software en que se desarrolló la aplicación, será necesario mejorar la programación del modelo para permitir una mayor disponibilidad de recursos computacionales que permitan un análisis de sensibilidad y de incertidumbre más completo y detallado de la medida PPK.
- El estudio ACB presentó limitación en contemplar los costos y beneficios asociados que surgen de otros impactos ambientales tan importantes que surgen de la aplicación de la medida como, i) efectos en los niveles de ruido, ii) efectos en infraestructura física, iii) efectos en los niveles de accidentalidad, iv) reducción de CO<sub>2</sub> (contaminación global) y otros contaminantes.
- Al igual que en el ítem anterior el estudio ACB no contempló aspectos importantes del análisis de los impactos económicos, los cuales no han sido evaluados hasta ahora en nuestro medio, estos básicamente corresponden al estudio de los efectos distributivos, sobre el comercio, el empleo y en general la competitividad local producto de la aplicación de medidas de restricción vehicular como el PPK, lo cuales deben considerarse como un costo de modificar la medida. Del lado benéfico se tendrían un aspecto relevante no evaluado como el ahorro en los tiempos de desplazamiento de las personas que se movilizan en los vehículos no sujetos a la restricción.
- El estudio ACB presentó limitación y falta de información sobre datos y estudios locales que mostraran la percepción y valoración que se tiene de aspectos importantes en este estudio como, i) valoración del tiempo de ocio, ii) valoración económica de las emisiones evitadas.
- Generar mejoras y refinamientos a la información utilizada en el estudio ACB presentado, con el objeto de poder plantear escenarios que permitan diferenciar y categorizar los vehículos por su impacto ambiental, permitiendo así diseñar medidas de gestión ambiental más justas y equitativas.

Si bien los resultados presentados en este trabajo presentan sus limitaciones en cuanto al análisis y evaluación de la medida PPK como mecanismo para mitigar las emisiones del parque automotor particular, si representa un importante aporte para plantear futuros estudios y desarrollos que apoyen a las autoridades encargadas de la gestión ambiental en nuestra localidad, a direccionar de la mejor manera, el cumplimiento de los objetivos que se tracen con la aplicación de medidas como el PPK o de cualquier otra.

## 7. RECOMENDACIONES

Los parámetros y la valoración de los aspectos considerados en desarrollo del estudio son susceptibles de ser modificados para un cálculo de balance más ajustado, a continuación se presentan una serie de recomendaciones que pretenden instar a la realización de trabajos complementarios, de mayor completitud y/o de mejor ajuste de los parámetros y de la estructura del modelo evaluativo usado, el cual representa un instrumento útil en la planeación, planificación y evaluación de medidas de gestión urbano- ambiental a nivel local.

- Consolidar alianzas entre los entes académicos y gubernamentales para desarrollar trabajos de valoración de los impactos de la contaminación ambiental asociada al parque automotor.
- Al igual, se requieren trabajos de mayor profundidad que permitan determinar los impactos y costos directos que sobre la economía local tiene la medida de restricción vehicular PPK o sus posibles modificaciones.
- Desarrollar trabajos que determinen los factores de emisión de los diferentes contaminantes para nuestra región, refinando el trabajo a rangos más cercanos de edad y potencia del motor; sumado a esto, diferenciarlos por tipo de combustible que usa. De esta manera podrán plantearse las medidas de restricción vehicular con objetivos ambientales, donde se premie el uso de los vehículos ambientalmente amigables y desincentive el uso de los altamente contaminantes, puesto que no impacta igual un vehículo con 10 años de antigüedad comparado a uno nuevo, tampoco lo es un motor con capacidad de 1000 cc a uno de 1800 cc y mucho menos lo será un vehículo que use gas natural a uno que use diésel.
- Evaluar un programa completo de gestión ambiental de las fuentes móviles, en donde se analice de manera particular y global los efectos (costos, beneficios, aceptabilidad, etc.) de las medidas planteadas para tal fin. Algunos aspectos que deberán contemplar las medidas son, i) calidad en los combustibles, ii) incentivos a la renovación y actualización tecnológica de vehículos (particulares y públicos), iii) incentivos, amplia disponibilidad y popularización del uso de transportes masivos, iv) uso de combustibles ambientalmente amigables, v) incentivos y campañas para las caminatas y la bicicleta como medio de transporte local. Entre otras.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ACQUATELLA, Jean. MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO. “Aplicación de Instrumentos Económicos en la Gestión Ambiental en América Latina y el Caribe: Desafíos y Factores Condicionantes. CEPAL. Publicaciones en Naciones Unidas. Santiago de Chile. 2001.
2. ALCALDÍA DE MEDELLÍN. DEC. N° 0097 DE 2005. “Por medio del cual se adopta una medida en tránsito para el mejor ordenamiento de la circulación en el Municipio de Medellín”. Medellín 2005. 11, p.
3. ALCALDIA DE MEDELLÍN, Mapas de Medellín y sus Corregimientos. [En Línea]. Medellín. 2007  
[http://www.medellin.gov.co/alcaldia/jsp/modulos/V\\_medellin/index.jsp?idPagina=860](http://www.medellin.gov.co/alcaldia/jsp/modulos/V_medellin/index.jsp?idPagina=860)  
[Consulta: 2 Nov. 2007]
4. AMVA, ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas en el Valle de Aburrá, Con Georeferenciación de éstas. Convenio 323 de 2005. Medellín: 2006. 210, p.
5. AMVA, ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRA. Encuesta Origen Destino de Viajes 2005 del Valle de Aburrá, Estudios De Tránsito Complementarios y Validación. Medellín: 2006. 124p.
6. AMVA, ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. Diagnóstico del Plan Maestro de Movilidad para la región metropolitana del Valle de Aburrá 2005 – 2020. Medellín: 2005. 497 p.
7. ANGEL, Enrique. Métodos Cuantitativos para la Toma de Decisiones Ambientales. Medellín: Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2004. 156 p.
8. ARACIL, Javier. Dinámica de Sistemas. Publicaciones Ingeniería de Sistemas, Madrid: Graficas Marte S.A. 1998. 79 p.

9. AZQUETA, Diego. Introducción a la economía ambiental. Madrid: McGraw-Hill, 2002. p. 29-52.
10. BARBA-ROMERO, Sergio y Jean-Charles POMEROL. Decisiones multicriterio: fundamentos teóricos y utilización práctica, España: Universidad de Alcalá, 1997. 420 p.
11. BOSCH, M; O'RYAN, R; MATAMALA, E. 2002. Estimación del Impacto de Medidas de Transporte en las Emisiones de Fuentes Móviles. Revista Ingeniería de Sistemas. Volumen XVI. Pág. (93- 119).
12. CHAABAN, F.B; NUWAYHID, I; DJOUNDOURIAN, S. 2001. A Study of Social and Economics Implications of Mobile Sources on Air Quality in Lebanon. En Transportation Research. Part D6. (2001) p 347-355.
13. CIA, (2007) The World Factbook, Disponible en línea: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/> Consultado en: Julio 25 de 2007
14. CIFUENTES, L. "Diseño y Evaluación de Medidas de Emisiones para el Sector de Transportes en la Región Metropolitana", en preparación para CONAMA RM. Santiago de Chile: 2007.
15. CIFUENTES, L. "Congestión y Contaminación: Emisiones Contaminantes Bajo Distintas Medidas y Sus Costos Sociales". Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas Pontificia Universidad Católica de Chile, SEMINARIO CEPAL/GTZ. Chile: 2002. 38 p.
16. CONAMA RM. "Análisis General del impacto económico y social del rediseño de plan operacional para enfrentar episodios críticos de contaminación atmosférica por material particulado respirable (PM10) en la región metropolitana". Santiago de Chile: 2007. 186 p.

17. CORREA, G y ROZAS P. Desarrollo Urbano e Inversiones en Infraestructura: Elementos para la Toma de Decisiones. CEPAL. División de Recursos Naturales e Infraestructura. 2006. 83 p.
18. DANE, Cuentas Nacionales Anuales (1990-2005). Disponible en línea: [http://www.dane.gov.co/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=33&id=57&Itemid=239](http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=33&id=57&Itemid=239) Consultado en: Junio 21 de 2007
19. DARGAY, J; GATELY, D. Income's effect on car and vehicle ownership, worldwide: 1960-2015 Transportation Research Part A: Policy and Practice. 1999.
20. DEL FAVERO, G; KATZ, R; SOLARI, J. RESTRICCIÓN A LA CIRCULACIÓN DE VEHÍCULOS CATALÍTICOS, En: Puntos de Referencia, editado por el Centro de Estudios Públicos, Vol. 225. 2000. 8 p.
21. DIRECCIÓN GENERAL DE GESTIÓN AMBIENTAL DEL AIRE. Dirección de Inventarios y Modelación de Emisiones Dirección de Instrumentación de Políticas. Elementos para la Propuesta de Actualización del Programa "Hoy No Circula" de la Zona Metropolitana del Valle de México Ciudad de México. 2004. 99, p.
22. EMERYS, E. David. "Principios de Economía". Primera Edición. Bogota-Colombia : Harcourt Brace Jovanovich, Publishers. 1988. 326p.
23. EL TIEMPO, (2007). Así está el panorama de las garantías que ofrecen las diferentes marcas de vehículos en el país. Disponible en línea: [http://www.motor.com.co/noticias\\_precios/vehiculos/17denoviembrede2007/ARTICULO-WEB-NOTA\\_INTERIOR\\_MOTORV2-3704563.html](http://www.motor.com.co/noticias_precios/vehiculos/17denoviembrede2007/ARTICULO-WEB-NOTA_INTERIOR_MOTORV2-3704563.html) Consultado en: 20 de noviembre de 2007
24. ESKELAND, G; DEVARAJAN, S. TAXING BADS BY TAXING GOODS "Pollution Control with Presumptive Charges". The World Bank Washinton, D.C. 1996. 67 p.

25. FERNANDEZ, Adrian. "Hacia un mayor rendimiento de combustible en la flota vehicular de México". 2004.
26. FIEL C, Barry. ECONOMIA AMBIENTAL "Una introducción". Editorial McGraw-Hill. Bogotá. 1997. 587p.
27. FIELD, Barry y Martha FIELD, Economía ambiental, Madrid: McGraw-Hill, 2003. 556 p.
28. FORRESTER J.W. "World Dynamics." MIT Press, 1971.
29. FRAUME, Nestor. Diccionario Ambiental. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2007.
30. GOBANT, GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA. Departamento Administrativo de Planeación. Anuario Estadístico de Antioquia, 2005. [En línea]. Medellín. 2006. <http://www.planeacionantioquia.gov.co/anuario2005/> [Consulta: 2 Ago. 2007].
31. GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL, Secretaria del Medio Ambiente. Dirección General de Gestión del Aire, Dirección de Instrumentación de Políticas. "Actualización del Programa Hoy no Circula". Ciudad de México. 2004. 40, p.
32. GOODWIN, P; DARGAY, J y HANLY, M. 2003. Elasticities of Road Traffic and Fuel Consumption with Respect to Price and Income: A Review. ESRC Transport Studies Unit, University College London, London, UK. 18 p.
33. GOODWIN, P.B. A review of new demand elasticities with special reference to Short and Long Run effects of price changes, Journal of Transport Economics and Policy, Vol. 26(2), 1992. p. 155-176.
34. GUTIÉRREZ, L. y FEY , W. Ecosystem Succession, The MIT Press, 1980.
35. HANLEY, Nick; SHOGREN, Jason; WHITE, Ben. 1997. ENVIRONMENTAL ECONOMICS "In Theory and Practice". OXFORD UNIVERSITY PRESS. 464p.

36. [MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL](#); Decreto 244 de 30 de enero de 2006. Republica de Colombia.
37. NAREDO, J. M. Sobre el origen, el uso y el contenido del termino sostenible. *Primer catálogo español de buenas prácticas*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Madrid, España. (1996).
38. LARSEN, Bjorn; SANCHEZ-TRIANA, Ernesto y AWE, Yewande. Fijación de prioridades ambientales: un proceso bidireccional. En: SANCHEZ-TRIANA, Ernesto; AHMED, Kulsum y AWE, Yewande. Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia: un análisis ambiental del país para Colombia. Bogotá: Banco Mundial, 2006. p. 115-165.
39. PEARCE, D.W. y TURNER R.K. Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente. Celeste Ediciones, Madrid. 1995.
40. QUADRI DE LA TORRE, G; SANCHEZ, C. 1992. La Ciudad de México y La Contaminación Atmosférica. Editorial LIMUSA. 316 p.
41. RAUL O'RYAN. La Sustentabilidad Ambiental del Transporte Urbano: El Caso de Santiago de Chile. Serie Economía N° 30. Santiago de Chile: 1998. 33 p.
42. ROMERO, Carlos. Economía de los recursos ambientales y naturales, Madrid: Alianza Editorial, 1994. 189 p.
43. SÁNCHEZ-TRIANA, Ernesto, Kulsum AHMED y AWE, Yewande. Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia, Bogotá, Banco Mundial en coedición con Mayol Ediciones, 2006, p. 117- 121.
44. SECRETARÍA DE TRÁNSITO DE BOGOTÁ. s.f. 'Pico y placa' en Bogotá: Ejercicio de Autorregulación Ciudadana. Disponible Consultado en: <http://www.transitobogota.gov.co>. Septiembre/2006.
45. STORCHMANN, Kart. Long-Run Gasoline demand for passenger cars: the role of income distribution. Economics Department, Yale University, United States. 2005. 34 p.

46. STTM, SECRETARÍA DE TRANSITO DEL MUNICIPIO DE MEDELLÍN. Parque Automotor del AMVA periodo (2003-2006). (Archivos de Excel). Medellín: El autor. 2007.
47. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGETICA. Proyección de Demanda de Energía para el Sector Transporte Terrestre. Documento UPME. 2006
48. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGETICA. Proyección de Demanda de Energía para el Sector Transporte Terrestre. Documento UPME. 2007
49. WATTENBACH, H. 2001. LA ECONOMIA AMBIENTAL A LA LUZ DE LA POLITICA AMBIENTAL EN COLOMBIA. "Conceptos y Aplicaciones". Programa de Ecología Tropical (TOB). Bogota D.C.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1

1. **TITULO:** Sondeo de opinión realizado a una población de 200 personas a las que se aplica la medida de restricción vehicular PPK.
2. **INTRODUCCIÓN:** Se plantea como metodología para este muestreo un método no probabilístico (no se tiene certeza del error), aun siendo conscientes, que no se pueden generar estimaciones inferenciales precisas sobre la población, pues no se tiene certeza de que la muestra extraída sea representativa, ya que no todos los sujetos de la población tienen la misma probabilidad de ser elegidos.

El tipo de muestreo realizado se denomina intencional o de conveniencia y se caracteriza básicamente por ser un esfuerzo deliberado de obtener muestras "representativas" mediante la inclusión en la muestra de grupos supuestamente típicos (población del municipio de Medellín sujetos a la medida PPK).

La población sondeada es de 200 personas, este tamaño y su método de estimación es aleatorio.

3. **FECHA Y LUGAR DE REALIZACIÓN:** El sondeo se llevo a cabo de forma aleatoria durante los días 27, 29 y 30 de marzo de 2008, y en dos estaciones de servicio que se eligieron al azar, son estas:
  - a. *BOMBA: TEXACO COLOMBIA (27 de marzo)*  
*DIR. Calle 50 # 57-34*  
*ENCARCADO: HUMBERTO CASTRO*
  - b. *BOMBA: ESSO INDUSTRIAL (29 y 30 de marzo)*  
*DIR. CR 48 # 16A-35*  
*ENCARGADO: JUAN FERNANDO GARCIA*
4. **FINALIDAD:** Obtener directa e intencionalmente una muestra de 200 individuos afectados por la medida PPK que opera en la ciudad de Medellín. Esta muestra deberá responder de manera ágil y fácil dos preguntas que tienen como objeto, alimentar un modelo conceptual.



## 5. OBJETIVOS

### GENERAL

Obtener información primaria (teniendo en cuenta las limitaciones) que sirva de insumo a un modelo conceptual desarrollado bajo dinámica de sistemas.

### ESPECIFICOS

- Obtener un estimado general del comportamiento que tiene la población de la ciudad de Medellín el día que es sometida a la medida PPK, frente a dos opciones de tiempo de parqueo del vehículo que usa regularmente.
- Obtener cuales son los medios de transporte alternativo que mas usa la población de Medellín el día que esta sujeto a la medida PPK.
- Tener como mecanismo de control del sondeo, el numero de la placa del vehículo que regularmente usa.

**6. PLAN DE DIFUSIÓN:** Los resultados obtenidos en este sondeo se presentaran en una tesis de maestría de forma impresa y digital.

El cuestionario sondeado se presenta a continuación:

*Universidad Nacional de Colombia  
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo*

*Sondeo de evaluación del programa de restricción vehicular Pico y Placa para el municipio de Medellín.*

1. (Marque con X) ¿El día que le toca Pico y Pica usted regularmente deja su vehículo parqueado durante:

(a) Todo el día \_\_\_\_ (b) Sólo las 4 horas que dura la medida \_\_\_\_

2. Si eligió la opción (a) en la pregunta anterior, regularmente que medio de transporte alterno usa:

(a) Otro vehículo sin restricción \_\_\_\_ (b) Taxi \_\_\_\_ (c) Bus \_\_\_\_ (d) Metro \_\_\_\_  
(e) Integrado \_\_\_\_ (f) Otro \_\_\_\_

3. Cual es la placa del vehículo que usa regularmente:

Los resultados obtenidos para la pregunta 1, son:

PREGUNTA 1	PLACA		
A	EKD042	A	EKK144
A	BBT617	A	FBY998
A	EWV080	A	BIO322
A	LAU009	A	FCR191
A	ITX130	A	MLM128
A	MLT011	A	EKM204
A	FGS329	A	FAL462
A	MQV626	A	TME637
A	EKV195	A	MNT121
A	ITW706	A	FBX883
A	BCD082	A	MMJ963
A	FBV798	A	FGI083
A	MNR429	A	MMS008
A	FAX431	A	LGD010
A	MNN272	A	FQS564
A	LAN862	A	FCR336
A	EVS380	A	RIG702
A	MDO374	A	FBV583
A	ITW239	A	EKT799
A	KCE245	A	EKW033
A	LAF369	A	FAS308
A	FCU577	A	FBY905
A	MNG189	45	TOTAL

PREGUNTA 1	PLACA		
B	FGJ951	B	UAH003
B	BPL472	B	MLJ303
B	MLC687	B	MNS327
B	CGJ583	B	MLP251
B	MAM162	B	DMK656
B	LMC604	B	FSP387
B	MMV557	B	MLS344
B	MMZ991	B	GIS302
B	MLQ511	B	MNA274
B	FCT675	B	FAX756
B	MQB865	B	ITU003
B	EWN875	B	MNP261
B	BYJ275	B	MNQ688
B	GRD895	B	FGR653
B	FBO750	B	FGU931
B	EWX578	B	LAQ966
B	EVW223	B	FAK158
B	LMC055	B	INF081
B	ITU543	B	FGT256
		B	ITU380
		B	MMA441

B	FCN375	B	EWU852
B	FAT973	B	MLY939
B	FGW977	B	FAX080
B	ERX008	B	NLA561
B	EKW558	B	MNJ981
B	FYA785	B	EWS563
B	MNG639	B	LAW093
B	MIJ447	B	MNJ827
B	MLV795	B	FGI901
B	MNC853	B	EKX724
B	FBU130	B	MNY001
B	MNT444	B	FAL683
B	FAK097	B	MNJ935
B	BRL244	B	MMS582
B	FGI056	B	FGJ529
B	RIG129	B	MNE732
B	EXT172	B	MMP083
B	BSA219	B	MNI035
B	BXE460	B	EWS200
B	EVN454	B	EWL521
B	EVY859		
B	EKQ406	B	EWR109
B	MMG637	B	CSV177
B	MNT040	B	FAW206
B	MNP687	B	BWV459
B	HEG116	B	MMG987
B	BKE429	B	MLF239
B	FBO650	B	FCN335
B	LAN093	B	ABK571
B	BUD759	B	FGI280
B	BZK116	B	FGO028
B	PZQ727	B	MNT922
B	FAZ817	B	ITW543
B	LAD669	B	FGM753
B	EVP033	B	EWP914
B	MLS333	B	CAW263
B	EKO017	B	KTV558
B	BWU568	B	MNY379
B	LAQ128	B	BZQ040
B	BBZ362	B	KBF555
B	FCL826	B	ITU049
B	LAC481	B	BHF846
B	EKO957	B	ITO804
B	MMI466	B	BLD166
B	FGQ097	B	MMU744
B	MNA553	B	BNI254
B	EWX080	B	CIK418
B	MNF211	B	MLL811
B	MLN775	B	EVW985

B	HUI400
B	MNE113
B	MNP481
B	MMH404
B	EWK473
B	ASC514
B	MMA640
B	FAT635
B	MLY715
B	MNT199
B	MNH217
B	FEB280
B	BFQ441
B	BMK633
B	FCL904
B	MNS864
B	MNG748
B	EWV485
155	TOTAL

Los resultados obtenidos para la pregunta 2, son:

PREGUNTA 1	PREGUNTA 2	PLACA
A	A	EKD042
A	A	LAU009
A	A	FGS329
A	A	BCD082
A	A	EVS380
A	A	MNG189
A	A	EKK144
A	A	FBV583
A	A	FAS308
	9	TOTAL

PREGUNTA 1	PREGUNTA 2	PLACA
A	B	BBT617
A	B	MLT011
A	B	MQV626
A	B	EKV195
A	B	ITW706
A	B	FBV798
A	B	MNR429
A	B	FAX431
A	B	MDO374
A	B	FCU577
A	B	BIO322
A	B	FCR191
A	B	MNT121
A	B	FBX883
A	B	FGI083
A	B	MMS008
A	B	LGD010
A	B	FQS564
A	B	FCR336
A	B	EKT799
A	B	FBY905
	21	TOTAL

PREGUNTA 1	PREGUNTA 2	PLACA
A	C	ITX130
A	C	FBY998
A	C	TME637
A	C	RIG702
	4	TOTAL

PREGUNTA 1	PREGUNTA 2	PLACA
A	D	EWW080
A	D	MNN272
A	D	LAN862
A	D	ITW239
A	D	KCE245
A	D	LAF369
A	D	MLM128
A	D	EKM204
A	D	FAL462
A	D	MMJ963
A	D	EKW033
11		TOTAL

