

EMISIONES DE LOS VEHICULOS LIVIANOS A GASOLINA EN SANTIAGO

Francisco Lepeley C., Luis A. Cifuentes L.

Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas

Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, San Joaquín

flepeley@ing.puc.cl , lac@ing.puc.cl

RESUMEN

Los vehículos livianos a gasolina son responsables de gran parte de las emisiones totales de CO, HC y NOx de Santiago, razón por la cual se han establecido diversos mecanismos de control de sus emisiones. Del estudio de los datos de medición de emisiones, consistentes en lecturas de la concentración volumétrica de CO y HC en los gases de escape en los controles existentes en Santiago, es posible establecer que la antigüedad es un factor importante en los niveles de emisión de los vehículos, observándose mayores emisiones a mayor antigüedad. Otro factor importante en los niveles de emisión de los vehículos es la presencia o no de convertidor catalítico, característica propia de los vehículos más nuevos, es decir aquellos año-modelos 93 y posteriores.

A partir de las mediciones de concentración de contaminantes se estimaron factores de emisión de CO y HC para los vehículos anteriores al año-modelo 1993, usando relaciones estadísticas de buen comportamiento para valores relativamente altos de emisiones. Para las emisiones de CO y HC de los vehículos nuevos y las de NOx de todos los vehículos, fueron utilizados factores de emisión obtenidos con anterioridad para Santiago. Con los factores de emisión y estimaciones de los kilómetros que recorren anualmente los vehículos, se obtuvieron las emisiones máxicas anuales de CO, HC y NOx para los distintos tipos de vehículos que componen este parque.

La modelación de emisiones presentada en este trabajo puede ser utilizada para la obtención de inventarios más exactos de las emisiones de estos vehículos, como también para la evaluación de medidas de control de emisiones, especialmente aquellas que involucren la distinción por antigüedad de los vehículos (retiro anticipado de vehículos, impuestos de emisión, etc.).

De la aplicación del modelo en el cálculo de emisiones totales del parque se obtuvieron algunos resultados interesantes, por ejemplo que la flota de vehículos catalíticos, que representaba en 1996 el 41% del parque, fue sólo responsable ese año de aproximadamente el 10% de las emisiones totales de CO, HC y NOx. Además, el modelo propuesto permitió estimar las emisiones futuras de los vehículos, siendo posible identificar aquellos que tienen mayores emisiones esperadas.

1. INTRODUCCION

Las emisiones de los vehículos a gasolina constituyen gran parte de las emisiones totales de contaminantes en Santiago. De acuerdo al último inventario de emisiones disponible, correspondiente al año 1997 (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 1997), la flota de vehículos livianos a gasolina, principalmente compuesta por vehículos privados, comerciales y taxis, es responsable del 72% del total de emisiones de monóxido de carbono, del 34% de los óxidos de nitrógeno y del 25% de los compuestos orgánicos volátiles, razón por la que el control de estas emisiones se hace indispensable en esta ciudad, donde los niveles de contaminación han alcanzado niveles inaceptables, que han originado la declaración de zona en estado de saturación por monóxido de carbono, material particulado y ozono y en estado de latencia por óxidos de nitrógeno (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 1996).

El monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NOx) emitidos por los vehículos a gasolina son generados en el proceso de combustión y son liberados únicamente por el tubo de escape. En cambio, las emisiones de hidrocarburos (HC) de estos vehículos se deben a cuatro mecanismos: evaporaciones de combustible en el llenado del estanque en la estación de servicio, evaporaciones desde el motor cuando éste está en operación, evaporaciones debidas a la temperatura ambiente o a la temperatura del motor luego de apagado y, por último, emisiones de escape de aquellos hidrocarburos que no son quemados en la combustión. De los cuatro posibles mecanismos de emisión de hidrocarburos, sólo las emisiones de escape y las evaporativas cuando el vehículo circula dependen directamente del kilometraje recorrido; en cambio, las evaporaciones desde el motor caliente dependen de la cantidad de viajes, las evaporaciones diurnas de la temperatura ambiente y las evaporaciones de combustible de la frecuencia de rellenado, por lo que a falta de un patrón único de uso de los vehículos no es posible asociar fielmente estas emisiones al uso de ellos.

Actualmente en la ciudad de Santiago existe control de las emisiones de CO y HC de los vehículos en uso a través de dos mecanismos. El primero de ellos corresponde a los controles en plantas de revisión técnica, los que tienen una cobertura total del parque y frecuencia anual para vehículos particulares y semestral para taxis. El segundo mecanismo de control de emisiones corresponde a controles aleatorios en la vía pública, los cuales tienen una cobertura más limitada. La medición de emisiones en ambos controles consiste en un análisis de gases de escape a dos velocidades de operación del motor, ralentí y 2.500 r.p.m., obteniéndose lecturas de concentración de CO y HC en %Vol y ppm, respectivamente (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 1994). Para las emisiones de NOx no existen normas de emisión para los vehículos en uso, por lo que no son medidas en los controles mencionados.

El objetivo de este estudio es la modelación de las emisiones de escape de CO y HC de la flota de vehículos livianos a gasolina de Santiago, a partir de la información recopilada en los controles de emisiones existentes. Para lograr este objetivo, el parque de vehículos se caracterizó en términos de tamaño, antigüedad, renovación, uso y modos presentes, características que junto a las lecturas de emisión de contaminantes en los controles mencionados, permiten la estimación de las emisiones de cada grupo de vehículos presentes en el parque.

El modelo propuesto tiene aplicación en la elaboración de un inventario de emisiones de la flota de vehículos considerada, la identificación de grupos de vehículos que requieren de mayor control y la evaluación de políticas de control de emisiones.

2. CARACTERÍSTICAS DEL PARQUE DE VEHÍCULOS LIVIANOS A GASOLINA DE SANTIAGO

Las emisiones contaminantes de los vehículos a gasolina dependen de varios factores, entre los cuales destacan: la eficiencia de combustión, la antigüedad, el uso, la calidad de los combustibles, la mantención de los motores y la existencia o no de dispositivos reductores (convertidores catalíticos en el caso de Santiago), estando todos ellos ligados de alguna forma. El efecto de la antigüedad en los niveles de emisión de los vehículos es importante, principalmente por el mayor desgaste de los motores más antiguos y por la mayor preocupación de los fabricantes por el diseño de motores más limpios durante los últimos años, por lo que en Santiago, al igual que en otras partes del mundo, es posible observar cierta relación entre los niveles de emisión y la antigüedad de los vehículos. Además, la presencia de convertidores catalíticos en los vehículos en Santiago está asociada también a la antigüedad de ellos, ya que en la práctica los vehículos equipados con estos dispositivos de control corresponden a aquellos año-modelos 93 y posteriores. Por otro lado, es claro que las emisiones totales de los vehículos dependen directamente del uso de ellos, entendiéndose por uso de los vehículos como la cantidad de kilómetros que ellos circulan en un período de tiempo, por lo que las emisiones totales de un vehículo particular son totalmente distintas a las de un taxi, ya que estos últimos tienen un uso mucho más intenso.

A partir de estas dos razones es que, para efectos de la modelación de las emisiones, el parque ha sido subdividido en grupos compuestos por vehículos de la misma antigüedad (año-modelo) y modo de transporte (particular o taxi). El parque de vehículos particulares comprende automóviles, camionetas, furgones utilitarios, station wagons y jeeps utilizados con fines particulares o comerciales. En cambio, el grupo de taxis comprende taxis básicos, taxis colectivos, taxis de turismo y autos escuela.

2.1. Datos utilizados

La información base utilizada para la elaboración de este estudio fue recogida de la literatura especializada, de los controles de vehículos llevados a cabo en la vía pública por el Departamento de Fiscalización del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y de los controles en plantas de revisión técnica durante 1995 y 1996. Dado que a las revisiones técnicas concurren todos los vehículos en forma obligatoria, la información corresponde a la totalidad de la flota de vehículos livianos a gasolina en uso en esos años.

2.2. Tamaño y composición del parque

Para la caracterización de la antigüedad del parque, todos los vehículos que se presentaron a las plantas de revisión técnica de la Región Metropolitana en 1996 fueron agrupados según año-

modelo y modo, procediéndose después al cálculo del tamaño de cada grupo. Los resultados obtenidos son presentados en la figura 2.1.

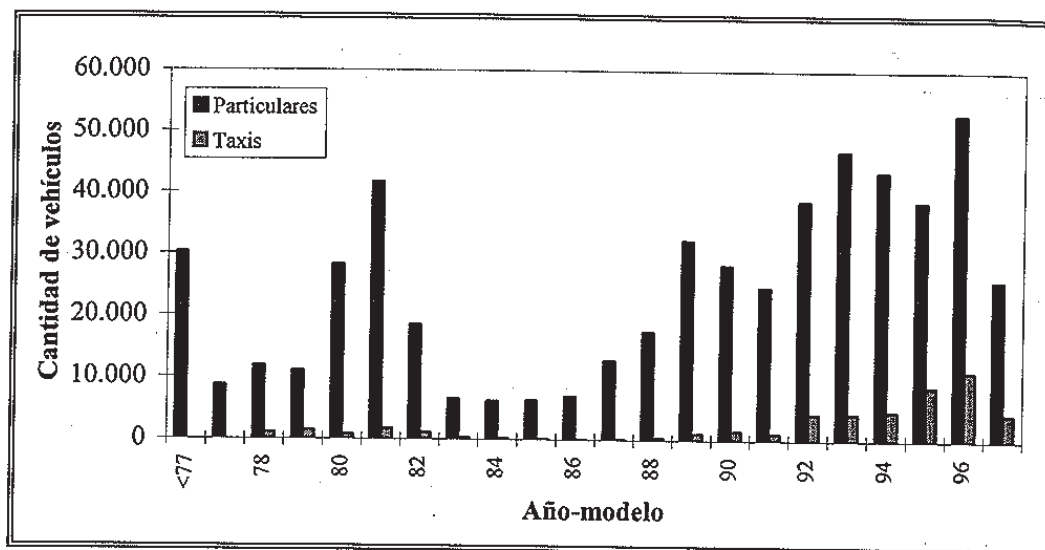


Figura 2.1 : Distribución del parque de vehículos livianos a gasolina en 1996 según año-modelo

En la figura anterior destaca la gran participación en el total de los vehículos particulares año-modelos 82 y anteriores, como también la juventud de la flota de taxis, concentrándose casi el total de estos últimos en los año-modelos 92 y posteriores. La inexistencia de taxis con año-modelos anteriores a 78 se debe a la prohibición de operar como tales para los vehículos con antigüedad de 18 ó más años (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 1992). La antigüedad media observada de cada flota en 1996 fue de 8,76 años para los vehículos particulares y de 4,68 años para los taxis. Respecto a la cantidad de vehículos de cada flota, ésta corresponde a 538.171 vehículos particulares y 48.436 taxis, totalizando 586.607 vehículos livianos a gasolina en Santiago en 1996.

2.3. Variación del parque entre 1995 y 1996

Por medio de la comparación de los datos de revisiones técnicas de 1995 y 1996 fue posible obtener la tasa de variación en el tamaño de cada grupo, tasa que representa la diferencia entre la tasa de entrada y la tasa de salida de vehículos de dicho grupo. La tasa de entrada depende de la importación de vehículos nuevos y de la inmigración de vehículos usados provenientes de otras regiones; mientras la tasa de salida depende de uno de los siguientes mecanismos: muerte, emigración, rechazo y retiro forzado. La tabla 2.1 presenta la variación del parque entre 1995 y 1996 para cada grupo, tanto en cantidad como en porcentaje.

Tabla 2.1

Variación en el número de vehículos livianos a gasolina entre 1995 y 1996

Año-modelo	Particulares		Taxis		TOTAL	
	Número	Tasa	Número	Tasa	Número	Tasa
<77	-351	-1,1%	0	-	-351	-1,1%
77	-83	-0,9%	-278	-100,0%	-361	-4,0%
78	136	1,2%	-752	-41,7%	-616	-4,5%
79	-88	-0,8%	-601	-29,5%	-689	-5,2%
80	-1.279	-4,3%	-231	-23,0%	-1.510	-4,9%
81	-1.928	-4,4%	-399	-18,4%	-2.327	-5,1%
82	-699	-3,6%	-223	-16,3%	-922	-4,5%
83	-376	-5,5%	-30	-10,1%	-406	-5,7%
84	-218	-3,4%	-18	-8,0%	-236	-3,5%
85	-261	-4,0%	-21	-11,1%	-282	-4,2%
86	-321	-4,4%	5	7,6%	-316	-4,3%
87	-433	-3,3%	6	5,0%	-427	-3,2%
88	-714	-3,9%	-16	-4,5%	-730	-4,0%
89	-1.321	-3,9%	-66	-5,8%	-1.387	-4,0%
90	-1.194	-4,1%	-193	-11,4%	-1.387	-4,5%
91	-1.308	-5,0%	-142	-11,1%	-1.450	-5,3%
92	-2.182	-5,3%	-508	-10,7%	-2.690	-5,9%
93	-1.864	-3,8%	-609	-12,4%	-2.473	-4,6%
94	-231	-0,5%	-576	-10,7%	-807	-1,6%
95	-13.532	-25,9%	-198	-2,2%	-13.730	-22,5%
96	28.676	118,0%	7.433	205,4%	36.109	129,3%
97	25.736	-	4.318	-	30.054	-
TOTAL	26.165	5,1%	6.901	16,6%	33.066	6,0%

Asumiendo que no existió inmigración durante 1996, es decir entrada de vehículos año-modelos anteriores a 95, la tasa de salida de vehículos de cada grupo puede ser estimada como el inverso aditivo de su tasa de variación, totalizando 33.097 vehículos retirados entre 1995 y 1996, correspondientes al 6% del parque en 1995. Por otro lado, si se asume que no hubo muerte de vehículos año-modelos 96 y 97 entre 1995 y 1996, la entrada de vehículos nuevos de esos año-modelos correspondió a 66.163 unidades (12% del parque de 1995), resultando un aumento neto de 33.066 unidades, correspondiente al 6% del parque de 1995. La gran cantidad de vehículos año-modelo 95 retirados entre 1995 y 1996 se puede deber a la presencia de vehículos que tuvieron su primera revisión técnica en la Región Metropolitana pero su destino final fue otra región.

También se debe señalar que existe intercambio entre las flotas de vehículos particulares y taxis, sobretodo en los casos en que estos últimos no pueden operar más como tales y se integran a la flota de vehículos particulares, razón por la cual existen bajas tasas de salida e incluso tasas de aumento en la cantidad de vehículos particulares de algunos año-modelos. Además, la aparición

de valores extraños para las tasas de salida de algunos años podría deberse a la existencia de fuga de vehículos (concurencia a otras regiones para la obtención de la revisión técnica) y a la pequeña cantidad de vehículos de algunos año-modelos en consideración.

Haciendo uso de todas estas consideraciones se modeló el intercambio y la salida de vehículos de acuerdo a su modo y antigüedad para los años 1995 y 1996, tasas que pueden ser proyectadas a futuro si son asociadas a la antigüedad de los vehículos. Para la flota de vehículos particulares se asumió que existe una tasa de retiro media de 4,17%, valor correspondiente al retiro total de vehículos año-modelos 94 y anteriores. En cambio, para los taxis se observó una tasa media de salida de 10,64% para aquellos con antigüedad entre 0 y 12 años y un aumento exponencial en esta tasa para los más antiguos, alcanzando 100% para aquellos de 18 años. Se debe considerar que esta tasa considera la transición de taxis a particulares, por lo que asumiendo que el retiro de taxis es igual a la de particulares (4,17%), la diferencia corresponde a dicha transición. La transición en el otro sentido (particular-taxi) fue considerada nula, ya que la Ley la restringe casi totalmente. La tabla 2.2 presenta las tasas de retiro e intercambio de vehículos para cada flota.

Tabla 2.2
Tasas de retiro e intercambio de vehículos según antigüedad

Antigüedad (años)	Retiro particulares	Intercambio parts.-taxis	Retiro taxis	Intercambio taxis-parts.
0-12	4,17%	0,00%	4,17%	6,47%
13	4,17%	0,00%	4,17%	12,16%
14	4,17%	0,00%	4,17%	14,23%
15	4,17%	0,00%	4,17%	18,86%
16	4,17%	0,00%	4,17%	25,29%
17	4,17%	0,00%	4,17%	37,52%
18	4,17%	0,00%	4,17%	95,83%
>18	4,17%	0,00%	-	-

2.4. Kilometraje recorrido anualmente

Para la estimación del kilometraje recorrido anualmente por los vehículos particulares se consideró las lecturas de odómetro de los vehículos con convertidor catalítico observadas en los controles en la vía pública durante 1996. El promedio anual fue de 23.184 kilómetros para los año-modelo 95, sobre una muestra de total de 1.159 unidades. Para el resto de la flota existen dos efectos que generan diferencias en el kilometraje recorrido por los distintos año-modelos: un menor uso de los vehículos a medida que son más viejos y la prohibición de circular uno o dos días a la semana para los vehículos sin convertidor catalítico durante gran parte del año. Realizando una analogía con resultados obtenidos para el parque de EE.UU. (Oak Ridge National Laboratory, 1996) se obtiene una tasa de disminución de uso de 757 kilómetros por año. La analogía anterior es respaldada por el hecho de que el kilometraje anual observado en los vehículos de un año de antigüedad en EE.UU. corresponde a 22.933 km, valor muy similar al observado en Santiago. Además, se asume que los vehículos sin convertidor catalítico circulan 6 días a la semana, es decir un 86% del tiempo que lo hacen los con convertidor. Por lo tanto, para

la estimación del kilometraje promedio recorrido por los vehículos particulares de cada año-modelo fue tomado como base el valor obtenido para el año-modelo 95 y fueron extrapolados los kilometrajes medios de los otros año-modelos usando las suposiciones indicadas.

Para el caso de los vehículos de arriendo o taxis existen lecturas de odómetro en las revisiones técnicas semestrales, por lo que fue posible calcular directamente el kilometraje recorrido semestralmente por casi todos los vehículos que conforman la flota de taxis. El kilometraje recorrido anualmente por los taxis es mucho mayor que el recorrido por los particulares y además presenta una mayor homogeneidad entre los distintos año-modelos. La figura 2.2 presenta los kilometrajes recorridos anualmente por los distintos tipos de vehículos según año-modelo.

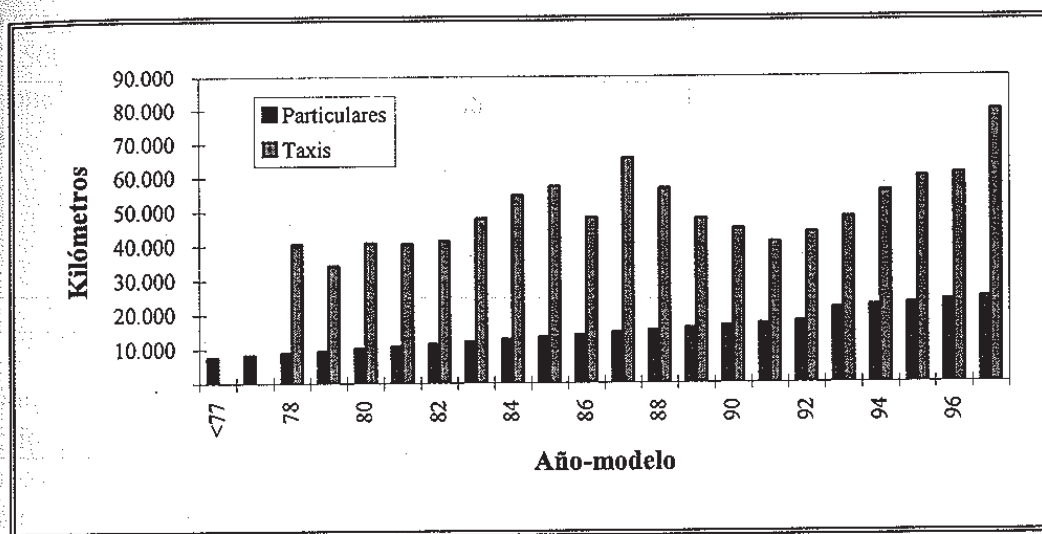


Figura 2.2: Kilometraje anual de los vehículos livianos a gasolina según año-modelo

3. EMISIONES DE LOS VEHICULOS

Para conocer lo que realmente emiten los vehículos no es suficiente conocer la concentración volumétrica de contaminantes en los gases de escape medida en los controles de emisiones, sino que interesa conocer la masa de cada contaminante que los vehículos emiten por unidad de tiempo, distancia o volumen de combustible. Dado que existe información confiable acerca del kilometraje que recorren los vehículos anualmente y no del tiempo de viajes o consumo de combustible de los distintos grupos considerados, es preferible obtener factores de emisión másicos por unidad de distancia recorrida, expresados en gramos de contaminante por kilómetro (gr/km).

3.1. Valores de CO y HC medidos en los controles de revisión técnica

Tal como fue señalado anteriormente, el control de gases en la revisión técnica consiste en un análisis de concentraciones de CO y HC en los gases de escape del vehículo, con éste detenido y libre de carga, a dos velocidades de operación del motor. El procedimiento antiguo establecía que los vehículos que no cumplían las normas de emisión debían acudir nuevamente, supuestamente

reparados, las veces que fuera necesario hasta que cumplieran con dichas normas. No obstante, lo anterior no garantizaba que el vehículo se mantendría en niveles de emisión bajo la norma hasta el siguiente control, por lo que para efectos de este modelo fueron consideradas las mediciones correspondientes a la primera vez que los vehículos se presentaron a la revisión técnica durante 1996, asumiendo que no existió preocupación por repararlos inmediatamente antes de la revisión. Esta suposición se basa en el hecho de que la revisión técnica tenía en el sistema antiguo un costo muy bajo respecto a cualquier otro control de diagnóstico disponible y que en caso de ser rechazados los vehículos, éstos podían repetir la revisión sin costo alguno para sus propietarios.

Tabla 3.1
Concentraciones promedio de CO y HC observadas en las revisiones técnicas en 1996

Año-modelo	Particulares			Taxis		
	N	CO (%Vol)	HC (ppm)	N	CO (%Vol)	HC (ppm)
<77	31.493	3,69	616	0	-	-
77	9.006	3,54	546	0	-	-
78	12.359	3,70	545	1.121	3,70	535
79	11.506	3,67	535	1.497	3,79	567
80	29.324	3,54	511	803	3,76	591
81	43.131	3,54	497	1.831	3,61	547
82	19.050	3,56	467	1.173	3,70	480
83	6.717	3,47	452	269	3,33	470
84	6.391	3,28	419	206	3,41	453
85	6.516	2,98	370	169	3,25	393
86	7.143	2,53	312	71	3,86	412
87	13.173	2,62	317	126	2,81	292
88	17.882	2,85	332	351	3,26	477
89	33.042	2,84	320	1.087	2,92	412
90	28.881	2,64	300	1.519	3,01	392
91	25.234	2,58	282	1.163	2,86	355
92	39.495	2,45	264	4.333	2,85	332
93	47.417	0,43	51	2.523	0,29	42
94	43.848	0,17	23	2.754	0,10	28
95	38.973	0,14	20	4.526	0,07	23
96	53.081	0,06	8	5.005	0,03	19
97	25.719	0,05	7	1.631	0,03	20

La muestra considerada comprende 581.815 vehículos efectivamente medidos (549.657 particulares y 32.158 taxis), cuyas lecturas promedio de concentración de CO y HC son presentadas en la tabla 3.1. Se debe destacar que para cada vehículo fue seleccionada la mayor lectura de concentración para cada contaminante entre ralenti y 2.500 r.p.m., dado que éste valor se correlaciona mejor con las emisiones máxicas (Lawson, 1995).

De los resultados obtenidos destaca la tendencia al aumento en los niveles de emisión con la antigüedad de los vehículos, como también la enorme diferencia existente entre los vehículos con convertidor catalítico y los convencionales.

3.2. Factores de emisión de la flota

Para la estimación de las emisiones másicas de los vehículos no equipados con convertidor catalítico fueron utilizadas relaciones desarrolladas a partir de una muestra de 681 vehículos de California, EE.UU. (Lawson, 1995). Las emisiones de los vehículos de dicha muestra fueron medidas en la prueba FTP75¹ y adicionalmente en ralentí y a 2.500 r.p.m. Se encontró una excelente correlación entre los valores máximos de concentración volumétrica de CO y HC entre ralentí y 2.500 r.p.m. y los valores de emisiones másicas obtenidos en la prueba en dinamómetro. Las relaciones obtenidas entre las emisiones másicas y las concentraciones volumétricas son las siguientes.

$$\text{CO (gr/km)} = 6,853 * \text{CO (\%Vol)} + 12,633 \quad r^2 = 0,97 \quad (1)$$

$$\text{HC (gr/km)} = 0,0057 * \text{HC (ppm)} + 0,939 \quad r^2 = 0,94 \quad (2)$$

Las relaciones anteriores fueron desarrolladas para vehículos con niveles de emisión en un rango muy amplio y se comportan muy bien para altos niveles de emisión, razón por lo que son utilizadas para convertir las lecturas de concentración de contaminantes a valores de emisiones másicas de los vehículos sin convertidor catalítico. Además se debe señalar que las relaciones originales fueron obtenidas en el sentido inverso, por lo que las acá presentadas fueron obtenidas a partir de una nueva regresión con los datos originales. Por otro lado, los valores de emisiones másicas correspondientes a lecturas de concentración iguales a cero son muy altos (12,63 grCO/km y 0,94 grHC/km) en comparación a factores de emisión comúnmente utilizados, por lo que no parece razonable el uso de estas relaciones para los vehículos con convertidor catalítico.

A partir de las consideraciones anteriores se decidió que para los vehículos equipados con convertidor catalítico serían utilizados factores de emisión de CO y HC ya utilizados anteriormente por la Comisión Nacional del Medio Ambiente para el parque de vehículos livianos de Santiago (Centro Nacional del Medio Ambiente, 1996). Además, para las emisiones de NOx también son utilizados los factores antes mencionados, tanto para vehículos con o sin convertidor catalítico, ya que no es posible la relación de dichas emisiones másicas con las lecturas de concentración de CO y HC. A pesar de que estos factores de emisión son bastante confiables, no hacen distinción entre vehículos de distinta antigüedad, separando el parque sólo entre vehículos con y sin convertidor catalítico, sin tomar en consideración las notables diferencias observadas en

¹ La prueba FTP75 corresponde al control federal de EE.UU. y consiste en la medición de masa de contaminantes liberada por los vehículos durante la simulación de un ciclo de manejo típico sobre rodillos conectados a un dinamómetro que simulan distintas velocidades y cargas. Si bien dicho ciclo de conducción fue diseñado de forma tal que representara la conducción en distintas ciudades norteamericanas, esa misma característica le otorga la universalidad y versatilidad necesarias para ser aplicado en Santiago, sobretodo considerando que a la fecha no ha sido definido un ciclo representativo para esta ciudad.

las mediciones de concentración de contaminantes. Los factores de emisión finalmente utilizados se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2
Factores de emisión de CO, HC y NOx para la flota
de vehículos livianos a gasolina de Santiago.

Año-modelo	Particulares			Taxis		
	CO (gr/km)	HC (gr/km)	NOx (gr/km)	CO (gr/km)	HC (gr/km)	NOx (gr/km)
<77	37,95	4,48	1,88	-	-	-
77	36,86	4,07	1,88	-	-	-
78	37,99	4,07	1,88	38,01	4,01	1,88
79	37,81	4,01	1,88	38,60	4,19	1,88
80	36,91	3,87	1,88	38,42	4,33	1,88
81	36,90	3,79	1,88	37,36	4,08	1,88
82	37,04	3,62	1,88	38,00	3,69	1,88
83	36,44	3,53	1,88	35,46	3,64	1,88
84	35,12	3,35	1,88	35,98	3,54	1,88
85	33,07	3,06	1,88	34,89	3,19	1,88
86	29,95	2,73	1,88	39,11	3,30	1,88
87	30,61	2,76	1,88	31,90	2,62	1,88
88	32,20	2,84	1,88	35,00	3,68	1,88
89	32,07	2,78	1,88	32,65	3,30	1,88
90	30,72	2,66	1,88	33,23	3,19	1,88
91	30,34	2,55	1,88	32,23	2,98	1,88
92	29,45	2,45	1,88	32,15	2,84	1,88
93	3,00	0,24	0,23	3,00	0,24	0,23
94	3,00	0,24	0,23	3,00	0,24	0,23
95	3,00	0,24	0,23	3,00	0,24	0,23
96	3,00	0,24	0,23	3,00	0,24	0,23
97	3,00	0,24	0,23	3,00	0,24	0,23

4. APLICACIONES DEL MODELO

El modelo de emisiones presentado tiene varias utilidades posibles, que van desde la estimación de las emisiones totales de la flota, hasta la evaluación de políticas de control de emisiones de estas fuentes móviles. En este caso particular se ha usado el modelo para calcular las emisiones actuales de CO, HC y NOx de cada grupo de vehículos y del total del parque, como también las emisiones futuras por vehículo, a modo de identificar así los vehículos más emisores actualmente y aquellos con mayores emisiones esperadas en el futuro.

4.1. Estimación de las emisiones totales de la flota

A partir de los factores de emisión obtenidos para los vehículos livianos y del kilometraje recorrido anualmente por ellos es posible la estimación de las emisiones anuales unitarias de los vehículos componentes de cada grupo considerado. Las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 presentan respectivamente la masa de CO, HC y NOx emitida por cada vehículo anualmente.

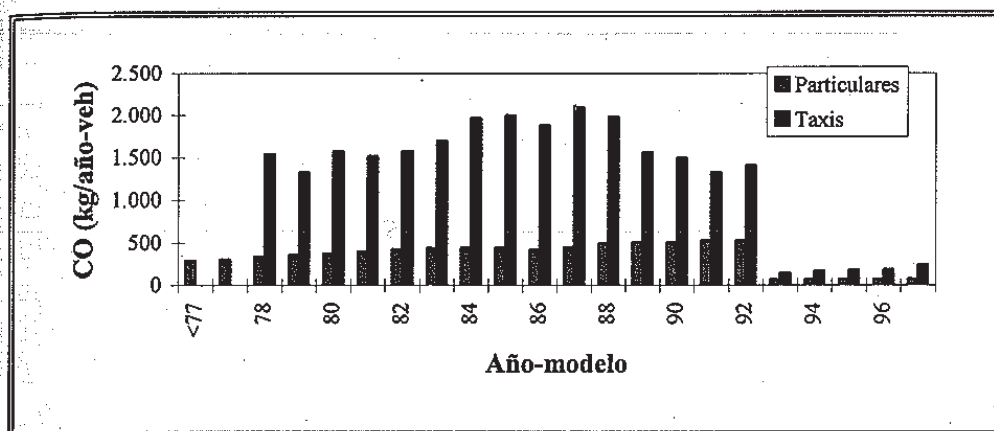


Figura 4.1: Masa de CO emitida anualmente por vehículo según año-modelo

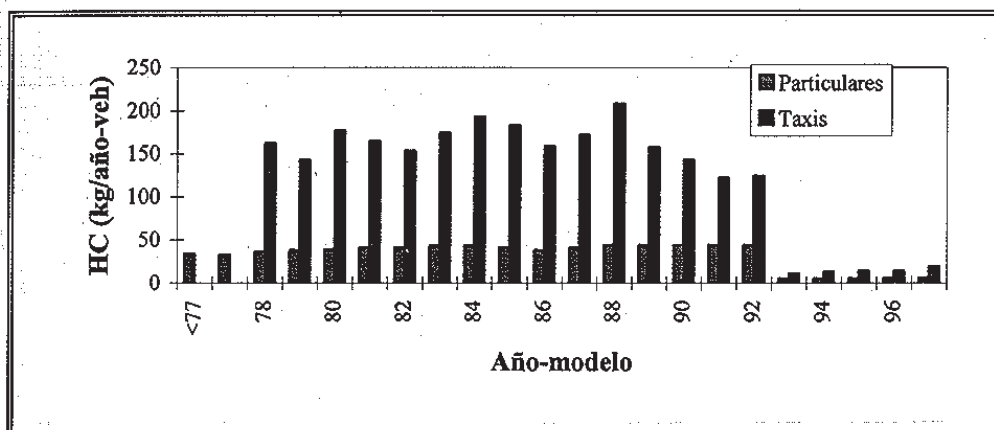


Figura 4.2: Masa de HC emitida anualmente por vehículo según año-modelo

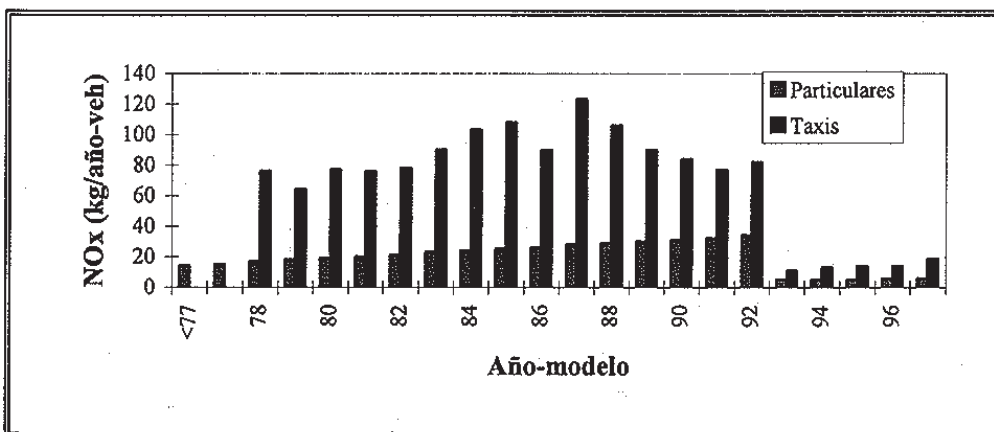


Figura 4.3: Masa de NOx emitida anualmente por vehículo según año-modelo

Una vez conocida la tasa anual de emisiones de cada tipo de vehículo y la cantidad de vehículos de cada tipo, la obtención de las emisiones totales de cada grupo y del total del parque considerado es inmediata. Los valores correspondientes a estas emisiones agregadas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.1

Emisiones totales de los vehículos livianos a gasolina por modo y año-modelo

Año-modelo	Particulares			Taxis			TOTAL		
	CO (ton/año)	HC (ton/año)	NOx (ton/año)	CO (ton/año)	HC (ton/año)	NOx (ton/año)	CO (ton/año)	HC (ton/año)	NOx (ton/año)
<77	8.647	1.028	423	0	0	0	8.647	1.028	423
77	2.620	286	130	0	0	0	2.620	286	130
78	3.997	428	202	1.619	170	80	5.616	599	282
79	3.981	421	200	1.902	206	92	5.883	627	292
80	10.566	1.102	537	1.211	137	59	11.778	1.238	596
81	16.575	1.707	833	2.680	292	134	19.255	1.999	967
82	7.834	758	388	1.797	175	89	9.631	932	477
83	2.863	280	150	452	46	24	3.314	326	174
84	2.775	267	149	407	40	21	3.182	307	170
85	2.794	259	158	336	31	18	3.130	289	176
86	2.910	263	180	133	11	6	3.044	275	187
87	5.751	525	359	266	22	16	6.017	547	374
88	8.599	766	505	680	71	36	9.279	837	541
89	16.518	1.420	968	1.675	170	97	18.194	1.589	1.065
90	14.435	1.243	876	2.229	214	126	16.664	1.457	1.001
91	12.931	1.086	790	1.505	139	88	14.435	1.225	877
92	20.445	1.704	1.317	5.967	526	348	26.412	2.230	1.665
93	3.050	235	235	623	47	47	3.673	282	282
94	2.916	218	218	804	62	62	3.720	280	280
95	2.707	193	193	1.561	121	121	4.268	315	315
96	3.815	318	318	2.023	155	155	5.837	473	473
97	1.904	154	154	1.036	82	82	2.941	236	236
TOTAL	158.633	14.660	9.280	28.907	2.717	1.703	187.539	17.378	10.983

El modelo de emisiones desarrollado asigna entonces 187.550 toneladas de CO, 17.415 toneladas de HC y 10.994 toneladas de NOx al año a los vehículos livianos a gasolina. Estos valores no distan mucho de los presentados en el inventario de CONAMA de 1997 para estas fuentes (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 1997), correspondientes a 201.561 toneladas de CO, 18.061 toneladas de HC y 16.717 toneladas de NOx, con la salvedad de que el inventario CONAMA incluye las emisiones evaporativas de HC de los vehículos al circular y el modelo propuesto no. Nuestro modelo indica que la flota de vehículos con convertidor catalítico, que representaba el 41.1 % de los vehículos en 1996, contribuía con el 10,9% de las emisiones anuales de CO, el 9,1% de las emisiones anuales de HC y el 14,4% de las emisiones anuales de

NOx. Aunque las emisiones por vehículo son mucho menores para los vehículos con convertidor catalítico, el mayor número de kilómetros recorridos al año por dichos vehículos hace que su contribución a las emisiones anuales sea mayor.

Aunque este modelo no considera las emisiones de otros contaminantes ni las emisiones de hidrocarburos por mecanismos distintos al escape, podrían ser utilizados factores de emisión no desarrollados directamente para la flota chilena en combinación con las otras características presentadas, es decir kilometraje anual y cantidad de vehículos presentes, para estimar así dichas emisiones.

4.2. Emisiones futuras de los vehículos

Las emisiones futuras de los vehículos dependerán de los niveles de emisión de contaminantes, del kilometraje y de la esperanza de vida en el futuro. Además, dado que existe intercambio de vehículos entre la flota de taxis y la de particulares, la esperanza de emisiones futuras de un taxi debe considerar las posibles emisiones como taxi y como particular. Por lo tanto, la esperanza de emisiones futuras de un vehículo vivo en el año 0 están dadas por la siguiente fórmula.

$$\sum_{t=1}^{\infty} (FE_{k,j,part} * Km_{j,t,part} * P(part)_t + FE_{k,j,taxi} * Km_{j,t,taxi} * P(taxi)_t) \quad (3)$$

Donde $FE_{k,j,modo}$ corresponde al factor de emisión de contaminante k para un vehículo año-modelo j de cierto modo en el año t , $Km_{j,t,modo}$ al kilometraje a recorrer anualmente por un vehículo año-modelo j de cierto modo en el año t y, finalmente, $P(modos)_t$ corresponde a la probabilidad de que el vehículo en cuestión exista como un vehículo de cierto modo en el año t .

Asumiendo que los factores de emisión (FE) permanecen constantes, que el kilometraje anual disminuye de acuerdo a la tasa actual y que las probabilidades de vida pueden ser calculadas a partir de las tasas de transición estimadas para 1995-1996, se pueden estimar las emisiones futuras unitarias de los vehículos para los próximos diez años, presentados en las siguientes figuras.

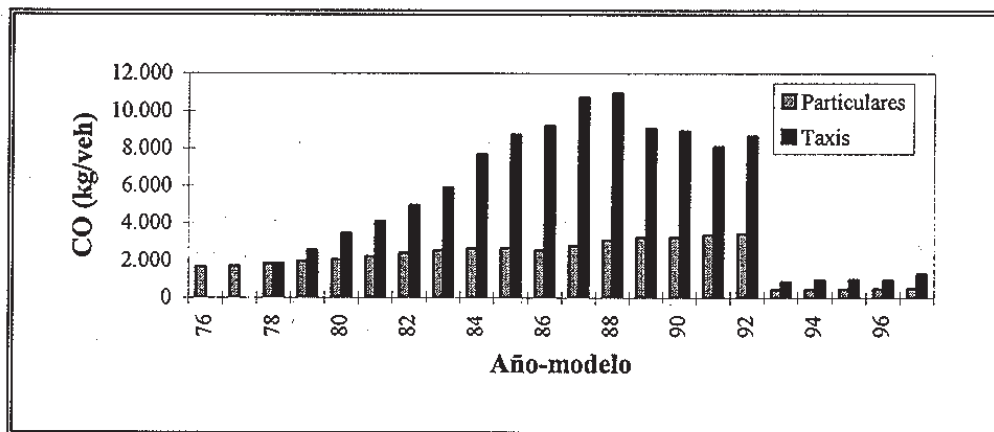


Figura 4.4: Emisiones de CO esperadas por vehículo en los próximos 10 años

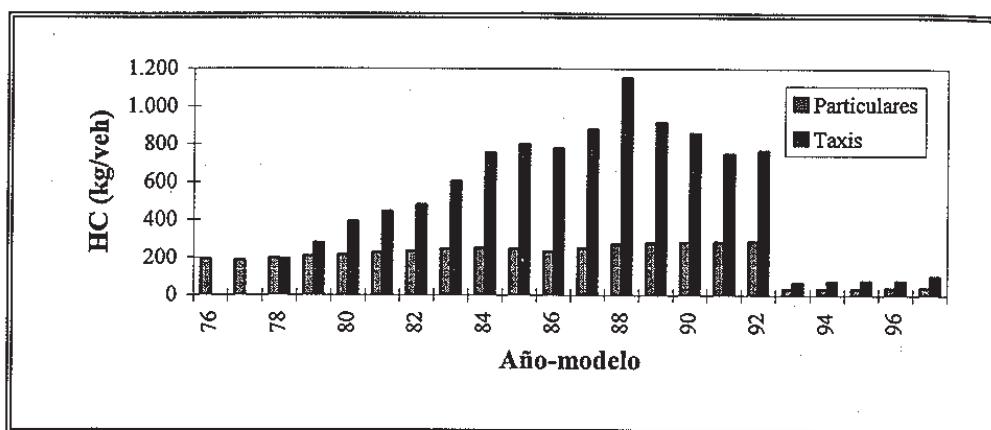


Figura 4.5: Emisiones de HC esperadas por vehículo en los próximos 10 años

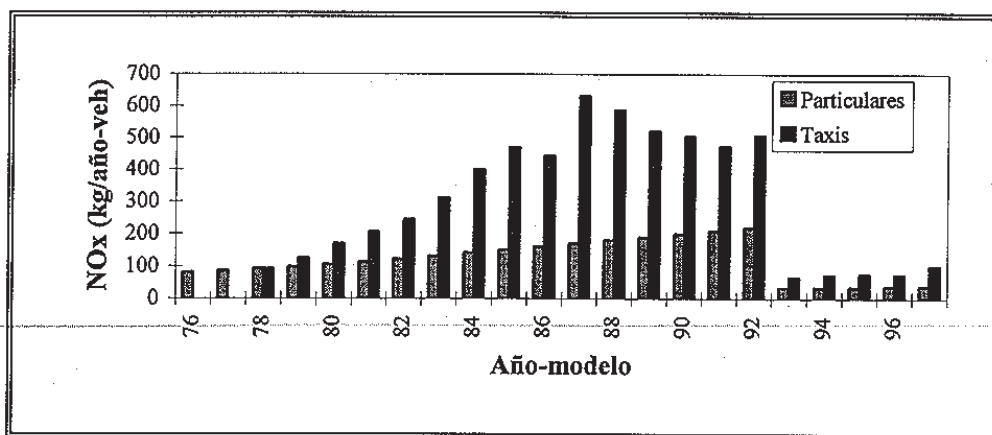


Figura 4.6: Emisiones de NOx esperadas por vehículo en los próximos 10 años

De las figuras anteriores se debe destacar que los vehículos cuyas emisiones futuras esperadas son mayores no son precisamente aquellos más emisores en la actualidad, sino más bien esos taxis que tienen todavía muchos kilómetros remanentes por recorrer y no están equipados con convertidor catalítico.

4.2. Aplicaciones futuras del modelo

Al analizar la participación de cada segmento del parque en el total de las emisiones de CO, HC y NOx y las emisiones esperadas por vehículo, la alternativa de retirar los vehículos viejos se presenta como una medida de control atractiva, sobretodo teniendo en consideración que ellos no tienen un alto valor económico, por lo que su adquisición por algún ente para destruirlos, o bien la prohibición de circular para ellos, no presentaría costos muy elevados. Por lo tanto, se recomienda la evaluación de medidas orientadas a retirar dichos vehículos, o bien a sólo reducir sus emisiones.

Además, este modelo puede ser utilizado para evaluar el efecto sobre el total de las emisiones de variaciones en el kilometraje recorrido por los vehículos, efecto asociado a restricciones de circulación y a políticas de reducción de la necesidad de transportarse y de distancias de viaje.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, que a través del Departamento de Fiscalización facilitó los datos correspondientes a las revisiones técnicas de la Región Metropolitana.

REFERENCIAS

Centro Nacional del Medio Ambiente (1996) Análisis de factores de emisión de fuentes fijas y móviles. Programa prioritario No. 2. Subprograma Fuentes Móviles. Informe final para la Comisión Nacional del Medio Ambiente. Diciembre de 1996.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (1996) Antecedentes para la declaración de zona saturada de la Región Metropolitana. Resumen Ejecutivo. Abril de 1996.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (1997) Anteproyecto del Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana. 25 de marzo de 1997.

Lawson, D. (1995) The Cost of "M" in I/M - Reflections on Inspection/Maintenance Programs. *Journal of the Air & Waste Management Association* 45, 465-476.

Lepelley, F. (1997) Un modelo de emisiones vehiculares para Santiago y su aplicación en la evaluación del retiro anticipado de vehículos antiguos. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería, P. Universidad Católica de Chile.

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (1992) Decreto No. 212 - Reglamento de los servicios nacionales de transporte público de pasajeros. *Diario Oficial*, 21 de noviembre de 1992.

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (1994) Decreto No. 4 - Establece normas de emisión de contaminantes aplicables a los vehículos motorizados y fija los procedimientos para su control. *Diario Oficial*, 29 de enero de 1994.

Oak Ridge National Laboratory (1996) *Transportation Energy Data Book*. Edition 16. Preparado para Office of Transportation Technology, U.S. Department of Energy. Agosto de 1996.