

---

**MODELACION DE EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS  
VEHICULARES A MICRO ESCALA: DESARROLLO ACTUAL Y VENTAJAS DE SU  
APLICACION EN CHILE**

Loreto Madrid Flores  
Consultoría Madrid y Asociados Limitada  
María Cristina 7033-A  
Fax: (56-2) 313 4033,  
e-mail: [lmadrid@myas.cl](mailto:lmadrid@myas.cl)

**RESUMEN**

Los modelos de emisiones basados en el desarrollo de factores de emisión locales aplicados a información resultante de modelos estratégicos de transporte efectuado en Chile poseen limitaciones al aplicarlos en la confección de Inventarios de Emisiones y para la evaluación de proyectos y medidas de menor escala.

El presente trabajo, denominado “Modelación de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos Vehiculares a Micro Escala: Desarrollo Actual y Ventajas de su Aplicación en Chile” pretende demostrar la factibilidad de aplicar estos modelos a la evaluación y diseño de proyectos de gestión e infraestructura de transporte y, en forma agregada, a la confección de inventarios de emisiones más realistas.

Para ello se desarrolló un modelo de emisiones basado en la estimación de Tasas de Emisión para cada componente del desplazamiento vehicular (aceleración, deceleración, ralentí y crucero), asociada también a la modelación de tránsito. Esto involucró el desarrollo de pruebas experimentales en el laboratorio de emisiones vehiculares que consideró el estudio de patrones de conducción desagregados en las componentes señaladas y su experimentación posterior. Las emisiones obtenidas fueron analizadas estadísticamente obteniéndose tasas de emisión como funciones cuadráticas de la velocidad. Al aplicar estas funciones a los indicadores de desempeño de una red simulada con TRANSYT para distintos tiempos de ciclo, los resultados obtenidos muestran reducciones de un 2% a un 3% de las emisiones, aproximadamente, comparando la operación de la red en mínima demora con respecto a la operación en mínimas emisiones, produciéndose estas últimas para ciclos más largos.

Estos resultados comprueban la factibilidad de aplicar la Modelación de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos Vehiculares a Micro Escala, su utilidad como herramienta de gestión de tránsito y su necesidad de perfeccionamiento y extensión a otras aplicaciones con el fin de obtener estimaciones de emisiones más precisas y coincidentes con el comportamiento del tránsito vehicular.

## 1. INTRODUCCION

Cuantificar las emisiones de contaminantes atmosféricos del transporte motorizado resulta una misión fundamental a la hora de diseñar y evaluar medidas de gestión o infraestructura de transporte tendientes a reducir los niveles de contaminación del aire. Pero también es una tarea imprescindible para la formulación de los inventarios de emisiones, herramientas usadas para la definición de la responsabilidad de las fuentes contaminantes en la contaminación del aire y como información de entrada de los modelos de calidad del aire. Asunto especialmente sensible si se trata de modelos fotoquímicos, que requieren información muy precisa sobre emisiones de hidrocarburos.

Dos son las debilidades que presentan las metodologías para estimar emisiones del transporte actualmente aplicadas en Chile, especialmente en la Región Metropolitana. Se trata de los modelos de emisiones basados en el desarrollo de factores de emisión locales aplicados a información resultante de modelos estratégicos de transporte. Este desarrollo, si bien ha alcanzado un nivel muy avanzado en el perfeccionamiento de los factores de emisión locales, adolece de importantes imprecisiones en la información base de transporte si se quiere utilizar para la confección de un inventario de emisiones de buena calidad. Sin embargo resulta de extrema utilidad si su aplicación se remite a la evaluación de planes estratégicos de transporte.

Esta misma dificultad se presenta si queremos obtener un indicador del avance en la descontaminación del aire una vez que las medidas de transporte han sido implementadas para estos fines, pues a la fecha no ha sido posible fundamentar cual es la reducción de emisiones asociada a una medida de transporte ni su impacto en los niveles de calidad del aire. Esto debido, no sólo a que la metodología impide su aplicación a una escala más de detalle, sino porque no se han desarrollado las herramientas ni de medición ni de modelación adecuadas para conocer este efecto.

El presente trabajo, denominado “Modelación de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos Vehiculares a Micro Escala: Desarrollo Actual y Ventajas de su Aplicación en Chile” es un intento por abordar este problema y proponer soluciones acordes a las capacidades tecnológicas y las necesidades presentes en el país.

### 1.1. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es:

**Demostrar la factibilidad de aplicar los Modelos de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos Vehiculares a Micro Escala en Chile, en la evaluación y diseño de proyectos de gestión e infraestructura de transporte y, en forma agregada, en la confección de inventarios de emisiones más realistas.**

Para ello se abordó un conjunto de objetivos específicos, a saber

- Proveer una metodología adecuada a una información más precisa de la operación del transporte motorizado.
- Encontrar y desarrollar las herramientas de modelación más eficaces para la aplicación de esta metodología
- Verificar su aplicabilidad mediante su uso en un caso práctico e inferir sus posibilidades de desarrollo y de extensión a otras aplicaciones

## 1.2. Antecedentes Bibliográficos

Los modelos de emisiones atmosféricas vehiculares a micro escala se fundamentan, principalmente en la necesidad de reproducir el comportamiento de las emisiones del transporte lo más cercana a la realidad posible, incursionando en el estudio de la operación de los motores a combustión que utilizan combustibles fósiles bajo distintas formas de conducción y su incidencia en la producción de contaminantes atmosféricos a una escala de detalle tal que permitan obtener información de gran precisión. La investigación se basa en reproducir el comportamiento de la conducción de los vehículos midiendo su rendimiento ambiental usando distintos métodos para obtener la información. A continuación se presentan ejemplos de aplicaciones desarrollados recientemente.

Un importante ejemplo de desarrollo en este campo es la simulación microscópica para evaluar el impacto de las aceleraciones y deceleraciones en la emisión de contaminantes atmosféricos. Este trabajo combina un modelo de tránsito de simulación microscópica y un modelo microscópico de emisiones desarrollado especialmente. Este último permite simular las emisiones segundo a segundo, como una función de la razón de combustible, los índices de salida de gases y la fracción de paso del catalizador (Hualiang et al, 2001). El modelo fue desarrollado usando como base información de emisiones de hidrocarburos totales (HCT) y monóxido de carbono (CO), recolectada directamente de un vehículo en movimiento instrumentado con un sensor remoto, además de otras fuentes de información provenientes de distintas pruebas de laboratorios usando ciclos de conducción. Esto permitió establecer relaciones entre las emisiones y los perfiles de velocidad instantánea. Los principales resultados obtenidos corresponden a modelos no lineales de emisiones que toman como variables la aceleración y la deceleración, su magnitud y su duración instantánea y en los períodos previos, permitiendo obtener estimaciones de emisiones mucho más cercanas que con la modelación macroscópica.

Otro ejemplo de desarrollo que vincula los perfiles de velocidad con las emisiones se refiere al modelo de emisiones desarrollado para evaluar la efectividad de medidas de gestión de tránsito del Departamento de Transporte de Carolina del Norte en Estados Unidos (Frey et al, 2001). Se utilizó una metodología de recolección de información de emisiones y conducción en tiempo real con vehículos instrumentados, que luego fue analizada estadísticamente para producir la calibración del modelo de emisiones. Esta misma metodología de recopilación de información se utilizó posteriormente para evaluar las medidas una vez implementadas. Los principales hallazgos del estudio fueron:

- Factibilidad de medir emisiones de CO, NO, e HC en tiempo real en vehículos en movimiento.

- Tasas de emisión modal (aceleración, deceleración, ralentí y cruce) resultaron estables para la misma combinación vehículo/conductor.
- Las tasas de emisión medidas (en gr/seg) son mayores durante los períodos de aceleración.
- Las emisiones medidas aumentan con la congestión debido al aumento del número de aceleraciones.

La mejora de inventarios también ha contemplado modelos que incorporan la medición de emisiones en tiempo real o siguiendo patrones de conducción que simulan el comportamiento real de los vehículos en las calles, tal como se ha aplicado en California (Pollack, 1998) con resultados significativos en la estimación de emisiones.

## **2. ESTIMACION DE EMISIONES A MICROESCALA: ESTUDIO DE CASO**

### **2.1. Descripción de la Aplicación**

Una aplicación de modelación de emisiones a micro escala fue desarrollada en el trabajo de título “Estimación de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en Intersecciones Semaforizadas” (Madrid, 1998) cuyos resultados fueron utilizados posteriormente para modificar el TRANSYT 8S a fin de incorporar la opción de optimización por criterio de mínimas emisiones (Universidad Católica de Chile, 1999). Más tarde se mejoraron algunos aspectos relativos a la incorporación de las formas de conducción en los modelos de emisiones del Gran Santiago (CENMA, 2000), tomando como base la metodología de estudio de perfiles de aceleración de esta memoria. En esta misma línea de investigación se desarrolló el trabajo de título “Determinación Experimental de Ciclos de Conducción” (Rojas, 2003), en el cual se aplican técnicas estadísticas avanzadas sobre los datos obtenidos en CENMA (2000), obteniéndose nuevos patrones de conducción para el Gran Santiago.

El ejemplo de aplicación que se presenta a continuación es el mismo señalado anteriormente, debido a que no existen posteriores aplicaciones. Se trata de la comparación, por una parte, de las estimaciones de las emisiones modeladas en un área pequeña de la ciudad, caracterizada por estar libre de congestión y sin intersecciones saturadas, usando el método de micro escala y el método tradicional, y por otra, de cómo afecta esta variable en el diseño operacional de la red a la hora de aplicar el criterio de minimización de las emisiones.

La zona estudiada corresponde a área comprendida por los Ejes Vitacura y Las Hualtatas entre La Llavería y Embajador Doussagne, que corresponde a la red N°54 perteneciente al proyecto SCAT (Sistema de Control de Área de Tráfico) de la Unidad Operativa de Control de Tránsito (Auter, 1997).

### **2.2. Metodología Empleada**

La metodología empleada en el cálculo de emisiones a micro escala de la zona de estudio considera la determinación y aplicación de *tasas de emisión* representativas de cada una de las

componentes que es posible desagregar el desplazamiento de los vehículos, esto es: flujo libre (o velocidad crucero), ralentí, aceleraciones y deceleraciones. De esta forma se estimaron las emisiones locales asociadas a intersecciones aisladas y una red de semáforos utilizando estas tasas y las variables operativas resultantes del análisis de tránsito (demoras, detenciones y velocidades).

La estimación de emisiones utilizando tasas de emisión, se expresa de la siguiente forma:

$$E = \sum_i a_{i,a} [tec_i * l_a + ter_i * d_{i,a} + tea_i * det_{i,a} + ted_i * det_{i,a}] \quad (1)$$

Donde:

- E*: emisiones en gr/hr.
- tec<sub>i</sub>*: tasa de emisión a velocidad crucero del vehículo tipo “i” en gr/veh-km (depende de la velocidad).
- ter<sub>i</sub>*: tasa de emisión en ralentí del vehículo tipo “i” en gr/veh-seg.
- tea<sub>i</sub>*: tasa de emisión por aceleración del vehículo tipo “i” en gr/veh (depende de la velocidad).
- ted<sub>i</sub>*: tasa de emisión por deceleración del vehículo tipo “i” en gr/veh (depende de la velocidad).
- q<sub>i,a</sub>*: flujo del vehículo “i” en el acceso “a” en veh/hr.
- l<sub>a</sub>*: longitud de recorrido del acceso “a” en km
- d<sub>i,a</sub>*: demora del flujo tipo “y” en el acceso “a” en seg.
- det<sub>i,a</sub>*: % de detenciones del flujo tipo “i” en el acceso “a”

Las tasas de emisión expresadas en ( 1) se definieron como::

*Tasa de emisión a velocidad crucero o en arco (tec<sub>i</sub>)*: corresponde a la componente del desplazamiento de los vehículos asociada al recorrido en arco, que en este caso se consideró sin congestión, es decir a flujo libre.

*Tasa de emisión en ralentí (ter<sub>i</sub>)*: corresponde a la componente del desplazamiento en la cual el vehículo se encuentra detenido con el motor funcionando, denominada etapa en ralentí.

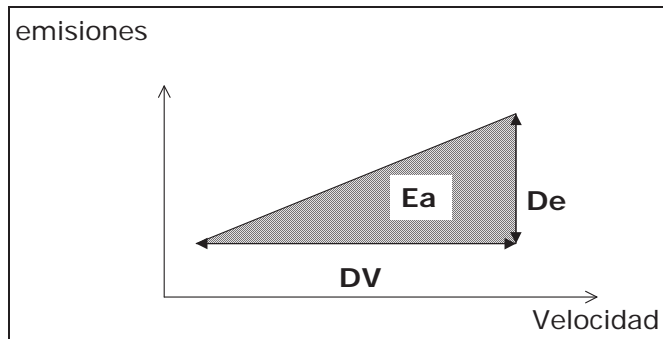
*Tasa de emisión por aceleración (tea)*: corresponde a la componente de aceleración asociada a las detenciones, es decir, se supone que una detención tiene asociada una deceleración previa y una aceleración posterior..

*Tasa de emisión en deceleración (ted<sub>i</sub>)*: corresponde a la componente de deceleración asociada a las detenciones, tal como se explica anteriormente..

La determinación de las tasas de emisión consideró en primer término, el estudio de los perfiles de aceleración y deceleración de la zona de análisis, expresadas como formas funcionales de las velocidades a flujo libre del tipo indicado en (2), vale decir, aceleración constante durante el período que esta se produce. Los perfiles de aceleración y deceleración responden a ajustes de regresión lineal de la velocidad en función del tiempo medidos en terreno mediante el uso de un vehículo instrumentalizado, especialmente acondicionado para este efecto, usando el método de vehículo flotante.

$$Y = mX + n \quad (2)$$

Las tasas de emisión por su parte, se determinaron a partir de ajustes lineales de las emisiones medidas y las velocidades reproducidas en el laboratorio de emisiones a partir de los perfiles de conducción de aceleración y deceleración descritos, que se expresan como formas funcionales de la diferencia de velocidad (DV) y las emisiones acumuladas (Ea) (ver (3)), o de la diferencia de velocidad (DV) y la diferencia de emisiones (De) (ver (4)) en el tiempo, dependiendo del tipo de contaminante y la tecnología vehicular en cada caso (ver Figura 1).



**Figura 1: Variables que Definen las Tasas de Emisión**

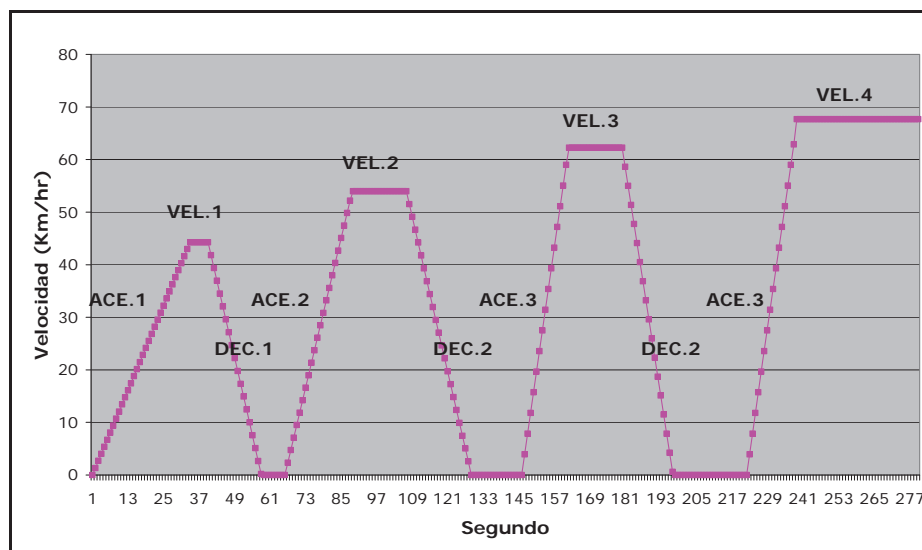
$$Ea = m1 \cdot DV + n1 \quad (\text{en gr}) \quad (3)$$

$$De = m2 \cdot DV + n2 \quad (\text{en gr/seg}) \quad (4)$$

Así, las tasas de emisión de aceleración y deceleración quedan expresadas de la siguiente manera:

$$te = A \cdot DV^2 + B \cdot DV + C \quad (\text{en gr}) \quad (5)$$

Las tasas de emisión para la velocidad cruceo y para los períodos en ralentí se calcularon como un promedio de las emisiones en el tiempo.



**Figura 2: Ciclo de Conducción Propuesto para las Pruebas Experimentales en el Laboratorio de Emisiones**

### 2.3. Estudio de Perfiles de Conducción

Este trabajo consistió en establecer “trazas modo” representativas de las distintas componentes del desplazamiento vehicular bajo condiciones normales (sin congestión), obteniéndose un ciclo de conducción que sintetizó, mediante análisis estadísticos de frecuencia y duración de las componentes, estas trazas constituyendo la curva base para su posterior reproducción en el laboratorio de emisiones (Figura 2).

### 2.4. Estudio de Emisiones a Micro Escala

El ciclo de conducción fue simulado en los laboratorios del Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV), del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, equipado con un simulador de condiciones reales de carretera RG 240 que permitió analizar las emisiones de Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Hidrocarburos Totales (HCT), Óxido de Nitrógeno (NO) y Oxígeno (O<sub>2</sub>) en un vehículo tecnología de emisiones y otro con carburador (con y sin convertidor catalítico, respectivamente).

**Tabla 1**  
**Parámetros de Ajuste de los Datos de Emisiones en Aceleración y Deceleración**  
**(para un Nivel de Confianza del 95%)**

| Contaminante    | Aceleración      |   |                |                  |   |                | Deceleración       |                         |                |                    |                  |                |
|-----------------|------------------|---|----------------|------------------|---|----------------|--------------------|-------------------------|----------------|--------------------|------------------|----------------|
|                 | Catalítico       |   |                | No Catalítico    |   |                | Catalítico         |                         |                | No Catalítico      |                  |                |
|                 | m                | n | R <sup>2</sup> | m                | n | R <sup>2</sup> | m                  | n                       | R <sup>2</sup> | m                  | n                | R <sup>2</sup> |
| HCT             | 0,0040<br>(44,6) | 0 | 0,867          | 0,0096<br>(34,9) | 0 | 0,820          | -0,0026<br>(-14,2) | 0,0279<br>(4,8)         | 0,652          | -0,0093<br>(-17,1) | 0,0645<br>(3,5)  | 0,761          |
| CO              | 0,058<br>(32,1)  | 0 | 0,789          | 0,121<br>(25,2)  | 0 | 0,711          | -0,026<br>(-8,6)   | 0,573<br>(5,9)          | 0,406          | -0,034<br>(-26,7)  | 0,590<br>(13,6)  | 0,885          |
| CO <sub>2</sub> | 1,03<br>(34,0)   | 0 | 0,794          | 0,94<br>(39,4)   | 0 | 0,828          | 0,046<br>(14,0)    | -0,902<br>(-8,7)        | 0,647          | -0,274<br>(-17,6)  | 7,644<br>(14,5)  | 0,771          |
| NO              | 0,0194<br>(23,3) | 0 | 0,717          | 0,0083<br>(30,4) | 0 | 0,786          | 0,00090<br>(11,6)  | -<br>0,02567<br>(-10,4) | 0,554          | -0,0005<br>(-7,7)  | 0,0387<br>(17,5) | 0,387          |

Al igual que en el análisis de modos de conducción, se separaron los datos en componentes de aceleración, deceleración, ralenti y velocidad crucero (o a flujo libre), para cada vehículo y contaminante considerado. Se realizaron varios análisis de correlación de las variables velocidad, aceleración, emisiones instantáneas y emisiones acumuladas. Los parámetros de ajuste de las ecuaciones (3) y (4) resultantes del análisis de los datos de emisiones en aceleración y deceleración se observan en la Tabla 1. Luego de aplicar la función (5) a estos parámetros, se calcularon los parámetros de las Tasas de Emisión para las componentes aceleración y deceleración, resultando en los valores que se muestran en la Tabla 2. Por último, se muestran las Tasas de Emisión calculadas para las componentes de flujo libre y ralenti para distintos rangos de velocidad (ver Tabla 3), de acuerdo a la metodología señalada al final del acápite 2.2.

**Tabla 2**  
**Parámetros de las Tasas de Emisión Calculados en Base a los Parámetros de Ajuste para la Aceleración y Deceleración**

| Contaminante    | Aceleración |        |   |               |        |   | Deceleración |        |       |               |        |       |
|-----------------|-------------|--------|---|---------------|--------|---|--------------|--------|-------|---------------|--------|-------|
|                 | Catalítico  |        |   | No catalítico |        |   | Catalítico   |        |       | No Catalítico |        |       |
|                 | A           | B      | C | A             | B      | C | A            | B      | C     | A             | B      | C     |
| HCT             | 0           | 0,0040 | 0 | 0             | 0,0096 | 0 | 0            | 0,0026 | 0,028 | 0             | 0,0093 | 0,064 |
| CO              | 0           | 0,058  | 0 | 0             | 0,121  | 0 | 0            | 0,0263 | 0,573 | 0             | 0,034  | 0,590 |
| CO <sub>2</sub> | 0           | 1,034  | 0 | 0             | 0,936  | 0 | 0,023        | 0,451  | 0     | 0             | 0,274  | 7,644 |
| NO              | 0           | 0,0194 | 0 | 0             | 0,0083 | 0 | 0,00045      | 0,0128 | 0     | 0             | 0,0005 | 0,039 |

**Tabla 3**  
**Tasas de Emisión de los Contaminantes en Flujo Libre y Ralentí, en Función de la Velocidad en un Rango de 0 a 70 Km/hr (gr/seg)**

| Contaminante    | Catalítico    |        |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|--------|
|                 | 0             | 44     | 57     | 63     | 70     |
| HCT             | 0,003         | 0,007  | 0,008  | 0,010  | 0,010  |
| CO              | 0,042         | 0,139  | 0,115  | 0,175  | 0,141  |
| CO <sub>2</sub> | 0,59          | 3,66   | 3,46   | 4,61   | 3,71   |
| NO              | 9,E-04        | 8,E-02 | 8,E-02 | 1,E-01 | 9,E-02 |
| Contaminante    | No catalítico |        |        |        |        |
|                 | 0             | 44     | 56     | 63     | 70     |
| HCT             | 0,006         | 0,016  | 0,014  | 0,016  | 0,017  |
| CO              | 0,097         | 0,255  | 0,249  | 0,284  | 0,237  |
| CO <sub>2</sub> | 0,52          | 3,18   | 2,88   | 3,17   | 2,67   |
| NO              | 4,E-05        | 3,E-02 | 2,E-02 | 3,E-02 | 2,E-02 |

Cabe señalar que la validez de las estimaciones de las tasas de emisión resulta cuestionable en términos de valores absolutos, principalmente por basarse en el análisis de sólo dos vehículos. A pesar de ello, los valores relativos de las tasas de emisión, así como también las tendencias del comportamiento relativo de las tasas son perfectamente válidas, en cuanto ellas representan el comportamiento típico observado en vehículos (CENMA, 2000)

## 2.5. Aplicación del Modelo a una Simulación de Tránsito

El área de estudio fue simulada con el modelo de optimización Transyt. A esta modelación se le aplicaron las programaciones actuales de los semáforos para el período Punta Mañana y Fuera de Punta constituyendo así la “Situación Actual”.

Los resultados obtenidos aplicando tanto las tasas de emisión calculadas, como el método clásico de factores de emisión a los valores de detenciones, demoras y velocidades obtenidas del modelo, se presentan en la Tabla 4.



**Tabla 4**  
**Emisiones Globales de la Red Calculadas Usando Factores de Emisión (Vehículos Livianos) y las Tasas de Emisión Calculadas.**

| Contaminante<br>kg/hr | Período Punta Mañana   |      |       |          |      |       |
|-----------------------|------------------------|------|-------|----------|------|-------|
|                       | Tasas                  |      |       | Factores |      |       |
|                       | Cat                    | Ncat | Total | Cat      | Ncat | Total |
| THC                   | 3.7                    | 3.5  | 7.2   | 0.9      | 167  | 168   |
| CO                    | 54.0                   | 39.2 | 93.3  | 14.2     | 1353 | 1368  |
| CO <sub>2</sub>       | 1327                   | 401  | 1729  | -        | -    | -     |
| NO                    | 25.3                   | 2.6  | 28.0  | 0.9      | 1.8  | 2.7   |
| Contaminante<br>kg/hr | Período Fuera de Punta |      |       |          |      |       |
|                       | Tasas                  |      |       | Factores |      |       |
|                       | Cat                    | Ncat | Total | Cat      | Ncat | Total |
| THC                   | 4.3                    | 4.1  | 8.4   | 0.8      | 160  | 161   |
| CO                    | 61.2                   | 43.5 | 104.7 | 13.4     | 1299 | 1312  |
| CO <sub>2</sub>       | 1510                   | 434  | 1944  | -        | -    | -     |
| NO                    | 28.2                   | 2.7  | 30.9  | 0.8      | 1.7  | 2.6   |

Además se realizó un análisis de sensibilidad de las emisiones para un rango de ciclos entre 40 y 120 segundos, siendo comparada con una Situación Base Mejorada, definida como una optimización de la “Situación Actual” que incorpora mejor información sobre velocidades y agrega un nodo semaforizado más. Los resultados obtenidos del análisis, donde se han aplicado las tasas de emisión se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5**  
**Resultados del Análisis de Sensibilidad de las Emisiones con el Tamaño de Ciclo Expresado en Indicadores de Rendimiento Anuales<sup>1</sup>**

| Indicador             | Base | Ciclo (seg) |       |      |      |             |      |             |      |             |  |
|-----------------------|------|-------------|-------|------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|--|
|                       |      | 40          | 50    | 60   | 70   | 80          | 90   | 100         | 110  | 120         |  |
| IR mill. \$           | 2.40 | 5.56        | 2.99  | 2.71 | 2.72 | <b>2.71</b> | 2.74 | 2.84        | 3.04 | 3.21        |  |
| Demora miles horas    | 342  | 735         | 357   | 334  | 343  | <b>342</b>  | 355  | 371         | 403  | 433         |  |
| Detenciones mill. veh | 44.2 | 82.4        | 59.2  | 48.9 | 45.8 | 44.6        | 42.9 | 42.7        | 42.6 | <b>42.2</b> |  |
| HCT Ton               | 37.3 | 57.9        | 43.3  | 39.2 | 38.2 | 37.5        | 36.8 | <b>36.8</b> | 37.1 | 37.1        |  |
| CO Ton                | 487  | 693         | 533   | 503  | 496  | 489         | 484  | <b>483</b>  | 488  | 489         |  |
| CO <sub>2</sub> Ton   | 9208 | 12861       | 10074 | 9523 | 9397 | 9256        | 9136 | <b>9133</b> | 9213 | 9213        |  |
| NO Ton                | 161  | 212         | 175   | 167  | 164  | 162         | 159  | <b>158</b>  | 159  | 159         |  |

## 2.6. Principales Conclusiones del Trabajo

El estudio de perfiles de aceleración resulta en extremo relevante para este método. En efecto, los procesos de aceleración y frenado no son continuos, es decir, no se realizan con una tasa única,

<sup>1</sup> Los valores de los indicadores corresponden a la suma de los valores por período ponderados por las horas al año correspondientes.

sino que obedecen a un conjunto de sucesivos cambios que tienden hacia un cierto valor. Sin embargo se pudieron reconocer tres perfiles típicos de valores constantes en distintos rangos (0,4; 0,7 y 1,1 m<sup>2</sup>/seg) que permitieron reproducir este comportamiento en el laboratorio. No obstante, el método utilizado para la obtención de los datos debe ser perfeccionado a fin de producir las condiciones de conducción más cercanas a la realidad posible.

Las tasas de emisión de aceleraciones y deceleraciones obtenidas, sintetizan el comportamiento de las emisiones para una cierta forma de conducir que, implícitamente, resume los distintos modos de conducción observados en el área de aplicación. Si este resultado pudiese extenderse hacia toda la red urbana, las tasas de emisión resultantes permitirían ser aplicadas a cualquier proyecto, independientemente de su localización en la ciudad, más aún, permitirían la evaluación de impactos en emisiones de medidas como implementación de lomos de toro, pasos peatonales y señales ceda el paso, entre otras, asociadas a las respectivas detenciones o reducciones de velocidad.

Aplicando las tasas de emisión como un ejercicio de optimización de la operación de la red estudiada se observa que existen reducciones de entre un 2% y un 3%, dependiendo del contaminante considerado, para el escenario más favorable en emisiones, en relación al escenario de menor índice de rendimiento (IR), calculado por el modelo Transyt (que a su vez coincide con el escenario de mínima demora). Es destacable señalar que el escenario de mínimas emisiones no coincide con el de menores detenciones calculadas por el modelo.

Si bien, a primera vista, la reducción de emisiones parece poco significativa, no lo es. En efecto, la simulación efectuada se realizó sobre una red no congestionada que responde a una carga vehicular menor, por lo tanto, mientras mayores sean los grados de congestión más significativas serán estas diferencias. Esto permite visualizar un importante potencial de reducción de emisiones asociado al diseño operacional de las redes usando la modelación de emisiones a micro escala con fines de optimización.

Sin embargo, cabe esperar que para situaciones congestionadas la optimización de emisiones coincida con los escenarios de mínimas detenciones calculadas por Transyt, debido a que el menor índice de rendimiento se produce con ciclos mayores y las emisiones también. Esto dado que, a menor número de detenciones (y por lo tanto de aceleraciones) se producen menores emisiones vehiculares. En este caso, lo más relevante de incorporar la modelación de emisiones a micro escala al diseño operacional de las redes no es precisamente el proceso de optimización, sino la información que aporta sobre el comportamiento de las emisiones vehiculares en condiciones de alto flujo vehicular.

### **3. POSIBLES APLICACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS DE LA MODELACIÓN DE EMISIONES A MICROESCALA**

La modelación de emisiones vehiculares a micro escala precisa mejorar ciertos aspectos tal cual es la estimación de las tasas de emisión. Por una parte se requiere ampliar el tamaño de muestra de los vehículos para así obtener resultados más representativos del parque vehicular, e incluir otros tipos de vehículos tales como buses y camiones (una vez que el laboratorio de emisiones vehiculares esté equipado para este fin). Y, por otra parte, profundizar el estudio de los modos de

conducción incorporando el análisis de aceleraciones y deceleraciones, principalmente mejorando los métodos de recolección de datos de forma de recoger el comportamiento de los conductores de forma más precisa.

Las principales ventajas que se aprecian de la modelación de emisiones vehiculares a micro escala son su simplicidad en la aplicación y su directa relación con las variables operacionales estimadas por los modelos de tránsito, lo cual permite conocer los impactos en emisiones de contaminantes utilizando esta información para evaluar y modificar el diseño de una medida o proyecto de transporte específico, a fin de minimizar dichos impactos.

Otra clara ventaja resulta de la aplicación del modelo, por ejemplo, al mejoramiento del Inventario de Emisiones de Transporte de la Región Metropolitana. Actualmente, éste se efectúa usando los resultados de la modelación estratégica de transporte y los factores de emisión tradicionales, metodología que resulta eficaz para evaluar proyectos estratégicos de transporte, pero insuficiente para estimar el comportamiento de las emisiones del transporte en la ciudad y su evolución en el tiempo. En efecto, contando con información sobre detenciones, demoras y velocidades crucero, en el Área Metropolitana de Santiago, ya sea recolectada a través de modelaciones efectuadas y/o de datos obtenidos de medición directa de estas variables (de forma automática, por ejemplo), la Modelación de Emisiones a Micro escala permite estimar las emisiones de manera más precisa y efectuar un seguimiento más realista de su evolución en el tiempo en relación al comportamiento del transporte urbano.

Las proyecciones de este modelo, incluso pueden apreciarse en la evaluación expost de medidas de gestión e infraestructura que requieren de un análisis de efectividad. Si obtenemos las principales variables que requiere el modelo será posible evaluar el rendimiento ambiental de tales medidas e incluso hacer un seguimiento en tiempo real mediante la obtención automática de estas variables.

Hoy día Chile posee la capacidad y tecnología requerida para desarrollar este tipo de aplicaciones. En efecto, pocos países cuentan con un laboratorio experimental de emisiones donde es posible efectuar pruebas a vehículos, lo que ha permitido el perfeccionamiento de los factores de emisión de vehículos livianos. Asimismo, la información de tránsito en tiempo real es una realidad en Santiago y con posibilidades de ser cada vez más precisa y detallada debido a la tecnologización de los sistemas de control. Esto facilita enormemente la evaluación del impacto en la calidad del aire producida por el tránsito vehicular y abre un amplio campo para la gestión de un transporte más sostenible.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi especial agradecimiento a Mauricio Osses y al Centro de Extensión del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, por su apoyo y colaboración en el desarrollo de la memoria de título que sirvió para gestar este trabajo y al DICTUC, al Centro de Control y Certificación Vehicular del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y a la Comisión Nacional del Medio Ambiente, Dirección Región Metropolitana, por facilitarme la información base requerida.

---

**REFERENCIAS**

Auter (1997). **Informe de modelación Red N°54 Vitacura**. Ilustre Municipalidad de Vitacura. Santiago, julio.

CENMA (1997). **Análisis de factores de emisión de fuentes fijas y móviles - Subprograma fuentes móviles**. Informe Final para la Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, diciembre.

CENMA (2000). **Mejoramiento del Inventario de Emisiones de la Región Metropolitana**. Informe Final para la Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, diciembre

Frey, H; Roupail, N; Unal, a; Colyar, J. (2001) **Emissions Reduction Through Better Traffic Management: An Empirical Evaluation Based Upon On-Road Measurements**. Prepared for North Carolina Department of Transportation. US, december

Hualiang, H; Lei, Y; Yi, Q (2001) **Analytical tool for measuring Emission Impact of ACCEL/DECEL** Prepared for Transportation Research Institute, Urban ITS Center, april.

Pollack, A.; Dunker, A; Scheyer, C. y Yarwood, G.,(1998) Revision of Light-Duty Vehicle Emission Inventories Using Real-world.Measurements-Auto/Oil Program, Phase II. **Air & Waste Management Association. Vol. 48, pág. 291- pág. 305.**

Universidad Católica de Chile (1998). **Estudio del efecto de un alza en el impuesto a la gasolina en las emisiones de contaminantes atmosféricos**. Estudio realizado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente, Dirección Región Metropolitana. Santiago, enero.

Universidad Católica de Chile (1999). **Estudio Propuestas de Diseño de los Instrumentos de Gestión Ambiental Tendientes a Reducir las Emisiones de la Actividad del Transporte y Análisis de sus Impactos Económicos, Sociales y de Efectividad en la Reducción de Emisiones**. Estudio realizado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente, Dirección Región Metropolitana. Santiago, junio.

Universidad de Chile (1996). **Determinación de factores de emisión para vehículos livianos y medianos, Informe Final**. Estudio realizado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente, Dirección Región Metropolitana. Santiago, septiembre.