

La Modelización Matemática en el Diseño Óptimo de Redes de Transporte Urbano con Restricciones Ambientales

Patricia N. Dominguez*, Marta C. Vidal** y Víctor H. Cortínez***

Abstract

Traffic congestion is one of the problems of greatest concern to the inhabitants of large cities, in terms of quality of life, as drivers and as members of society. As drivers they are affected by delays in travel times, which generate discomfort and stress. As members of society they suffer the noise and air pollution, a direct consequence of urban traffic. Although new technologies allow to constantly reduce the level of vehicle emissions, the increase of private cars in the city makes the pollutant concentration still worrying. Changes that are made to the transport network to meet the growing demand of travel, must consider both, the needs of users to reduce their travel time as well as the overall performance of the network and environmental consequences. Mathematical modeling is presented as an excellent tool to achieve both goals together. This paper presents the application of an urban traffic bi-level optimization model, developed earlier by the authors, to a hypothetical but realistic city, in order to highlight the need to solve traffic problems subject to environmental constraints to ensure efficient network with the least environmental cost.

Keywords: Sustainable transport, noise pollution, air pollution, traffic optimization, bi-level programming.

Fecha de recepción del original: 20/05/2010 | Fecha de evaluación del original: 21/07/2010

• Universidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina, 8000 | e-mail: pdoming@uns.edu.ar

•• Universidad Nacional del Sur, Departamento de Matemática, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina, 8000 | e-mail: mcvidal@criba.edu.ar

••• Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, 11 de abril 461, Bahía Blanca, Argentina, 8000 | e-mail: vcortine@frbb.utn.edu.ar

Resumen

La congestión de tráfico es uno de los problemas que más preocupa a los habitantes de las grandes ciudades, en cuanto a su calidad de vida, como conductores y como integrantes de la sociedad. Como conductores se ven afectados por las demoras en los tiempos de viaje, que generan incomodidad y estrés. Como integrantes de la sociedad sufren la contaminación acústica y atmosférica, consecuencia directa del tráfico urbano. Si bien las nuevas tecnologías permiten disminuir constantemente el nivel de emisión de los vehículos, el incremento de automóviles particulares en la ciudad, hace que la concentración de contaminantes siga siendo preocupante. Las modificaciones que se realizan en las redes de transporte para atender la creciente demanda de viajes, deben contemplar tanto las necesidades de los usuarios de reducir sus tiempos de viaje, como el comportamiento general de la red y las consecuencias ambientales. La modelización matemática se presenta como una excelente herramienta para lograr ambos objetivos conjuntamente. En este trabajo se presenta la aplicación de un modelo de optimización de tráfico urbano en dos niveles, desarrollado con anterioridad por los autores, a una ciudad hipotética, aunque con características reales, con el objeto de poner de manifiesto la necesidad de resolver los problemas de tráfico sujetos a restricciones medioambientales para lograr redes eficientes con el menor costo ambiental.

Palabras clave: Transporte sustentable, contaminación acústica, contaminación atmosférica, optimización del tráfico urbano, programación bi-nivel.

1. Introducción

Uno de los aspectos que más preocupa a la población de las grandes ciudades en cuanto a la calidad de vida, es la congestión de tráfico. El aumento de población y del tamaño de las ciudades incrementa tanto el número de viajes como las distancias que deben recorrer diariamente los ciudadanos para desplazarse entre sus hogares y los lugares de trabajo, educación, salud, esparcimiento, etc. Principalmente durante las horas pico de la mañana, cuando se produce el ingreso masivo hacia el centro de la ciudad y las horas pico de la tarde, cuando los usuarios de la red de transporte vuelven a sus hogares, se produce el conocido problema de congestión de tráfico que produce un aumento considerable en el tiempo de recorrido de las distintas rutas. Esta congestión trae aparejada disminución de velocidad y aún tiempos de inmovilidad con aumento considerable de emisiones de contaminantes atmosféricos. Por otra parte, el tráfico vehicular es también el principal componente del ruido urbano, que suele superar los niveles de incomodidad y estrés. El tráfico vehicular y la calidad de vida en lo que hace a condiciones medioambientales aceptables, están, por lo tanto, íntimamente relacionadas y la forma en que las ciudades se organicen para enfrentar la creciente demanda de viajes determinará la sustentabilidad ambiental.

Las decisiones que se toman a diario para solucionar problemas de tráfico tales como modificar la capacidad de ciertas calles, cambiar sentidos de circulación, impedir el paso de determinados tipos de vehículos, etc., impactan directamente en las condiciones ambientales. Por tal motivo resulta, no solo conveniente sino necesaria, la utilización de modelos que tengan en cuenta estos aspectos. El objetivo de un modelo de tráfico es obtener los patrones de flujo vehicular y los tiempos de viaje entre puntos de origen y destino. Estos flujos, velocidades y tiempos son los datos que requieren los modelos de emisión, dispersión y ruido, para determinar las concentraciones de contaminantes en el aire y el nivel sonoro. Es decir que los modelos de contaminación parten de condiciones de circulación conocidas. Estos datos pueden ser medidos en las redes existentes, pero cuando se plantea la pregunta ¿y que pasaría si...? se requiere de un modelo capaz de simular las nuevas situaciones para poder responder lo más certeramente posible a la cuestión que se plantea.

Las decisiones en cuanto al funcionamiento de la red de transporte corren por cuenta de los administradores de la red, de los planificadores y de los urbanistas, quienes responden al interés general de la población. Este interés puede ser justamente disminuir la congestión o los niveles de ruido y concentración de contaminantes en determinadas zonas o en toda la red, disminuir el número de accidentes o minimizar el tiempo total de permanencia en la red. Sin embargo, estos intereses a veces se contraponen con los de los usuarios particulares, que buscan, en general, su propio beneficio, es decir, reducir sus tiempos y/o costos de viaje.

Contemplar ambos intereses lleva a la utilización de un programa de optimización en dos niveles.

El objetivo del presente trabajo es mostrar algunas conclusiones interesantes, derivadas del trabajo con el modelo bi-nivel desarrollado con anterioridad por los autores [2].

En el apartado 2, se presenta brevemente el estado del arte en cuanto a los modelos de tránsito, contaminación acústica, contaminación atmosférica y programación en dos niveles. En el apartado 3, se describe el modelo propuesto, en el apartado 4 se aplica dicho modelo a un ejemplo numérico, y finalmente se presentan las conclusiones y la bibliografía más relevante.

2. Estado del Arte

De acuerdo al conocido “proceso de 4 pasos” de la planificación del transporte, generación-distribución-modo-asignación, en el último paso los viajes que los conductores particulares realizan entre puntos de origen y destino calculados en los pasos previos, se asignan a la rutas disponibles mediante algún criterio de decisión. En este momento entra en juego la relación oferta-demanda con una red física compuesta por calles e intersecciones y sus posibilidades de modificación por un lado (oferta) y el número de viajes que se espera entre puntos de la red (demanda) por otro. Como criterio de decisión se utiliza alguno de los principios de Wardrop [17]. El primer principio dice que todos los conductores elegirán las rutas de mínimo tiempo de recorrido y ninguno podrá experimentar un tiempo menor utilizando otra ruta. El segundo principio dice que bajo condiciones de equilibrio social, el tráfico se debe arreglar de manera tal que minimice el costo medio (o total) de viajar en toda la red. El primer principio sustenta la solución conocida como “equilibrio de usuario” y la segunda lleva al estado “óptimo del sistema”. Las soluciones obtenidas en la resolución del problema siguiendo estos principios, no lleva a patrones de flujo iguales por los dos caminos cuando las redes están congestionadas. En este punto es fundamental tener en cuenta que los usuarios se comportan de manera egoísta, buscando siempre su propio beneficio (menor tiempo de viaje), por lo cual la solución del equilibrio de usuario es más estable que la basada en el segundo principio. Por esta razón el “óptimo de sistema” sólo se utiliza como un indicador del funcionamiento general de la red, en la etapa de diseño o en sistemas centralizados de tránsito donde las decisiones sobre la elección de rutas no dependen del conductor.

Se siguen, en general, dos enfoques basados en estos principios. En el enfoque discreto, la ciudad se divide en zonas de acuerdo a características semejantes y de manera tal que se pueda asumir, con un error aceptable, que la actividad de las

mismas se encuentra concentrada en “centroides” que son los que generan y atraen los viajes hacia y desde otras zonas y las calles e intersecciones se representan como arcos y nodos de un grafo dirigido. En este caso, cada arco tiene una función asociada que representa el costo de viajar en dicho tramo. En el enfoque continuo, la red densa es aproximada a un continuo donde los conductores son libres de elegir sus rutas en un espacio bidimensional, y se acepta que la variación en áreas cercanas es pequeña comparada con el sistema completo y en consecuencia las características del sistema de transporte tales como flujo y costo pueden ser representadas con funciones matemáticas continuas. Este enfoque ha sido ampliamente desarrollado a partir del trabajo de Sasaki et.al [13]. En este trabajo se sigue el enfoque discreto.

Con respecto a la predicción de condiciones de contaminación urbana, acústica o atmosférica, se han realizado varios trabajos centrados en el desarrollo de formulaciones matemáticas que expresan la relación entre los flujos vehiculares y el nivel de contaminación. En el caso de contaminación acústica se ha trabajado fundamentalmente en el desarrollo de métodos de predicción de los niveles sonoros continuos equivalentes en función del flujo, la composición vehicular y la morfología de las vías de circulación. Se pueden citar en este sentido los trabajos de Gaja Díaz [5], V. H. Cortínez et al. [1] y A. E. González [6], éste último utilizado en el presente trabajo.

De la misma manera, en el caso de polución atmosférica se han desarrollado modelos teóricos a los efectos de obtener las concentraciones de sustancias tóxicas emitidas por vehículos en función de flujos vehiculares y variables meteorológicas, viento y temperatura, muchos de los cuales han sido validados mediante mediciones de campo. Entre los muchos trabajos en tal dirección pueden mencionarse los siguientes: Venkatram y Horst [16], Sivacoumar y Thanasekaran [14], y especialmente para ciudades argentinas pueden citarse los trabajos de Venegas y Mazzeo [15] para la ciudad de Buenos Aires y Puliafito [12] para la ciudad de Mendoza. En cuanto a la caracterización de emisiones existe mucha investigación en este campo destacándose los trabajos de Ntziachristos y colaboradores [10] autores de varios trabajos en los que se basa la redacción de la guía EMEP/CORINAIR 2009 [3] de la agencia europea de medioambiente de la cual se han tomado los datos para el presente trabajo.

Sin embargo, en la investigación en forma conjunta de modelos de contaminación y asignación de tráfico, existen relativamente pocos estudios, pudiéndose citar como uno de los más interesantes el de Guldman y Kim [7] que combina optimización de costos de construcción, consumo de combustible y tiempos de permanencia en la red con restricciones en la contaminación, desarrollado en un solo nivel.

La formulación en dos niveles ha sido utilizada en los problemas de diseño y operación de redes, no considerando aspectos ambientales, por Marcotte et al. [9] y Poorzahedy y Rouhani [11], entre otros.

Como ya se destacó anteriormente, la utilización de un enfoque integrado es fundamental en la resolución de problemas de asignación de tráfico y medio ambiente, y teniendo en cuenta la necesidad de compatibilizar criterios de decisión a nivel social y comportamiento individual de los usuarios, en este trabajo se presenta una formulación del problema como un programa de optimización en dos niveles según el modelo desarrollado previamente por los autores [2].

La estructura matemática de estos problemas de optimización es compleja pues lleva a problemas no convexos caracterizados por la presencia de muchos mínimos locales, para los cuales los métodos clásicos resultan inaplicables, recurriéndose a diversas técnicas meta-heurísticas, tales como algoritmos genéticos, sistemas de hormigas y *Simulated Annealing* que es la que se aplica en este trabajo.

3. Modelo general

3.1 Descripción del modelo

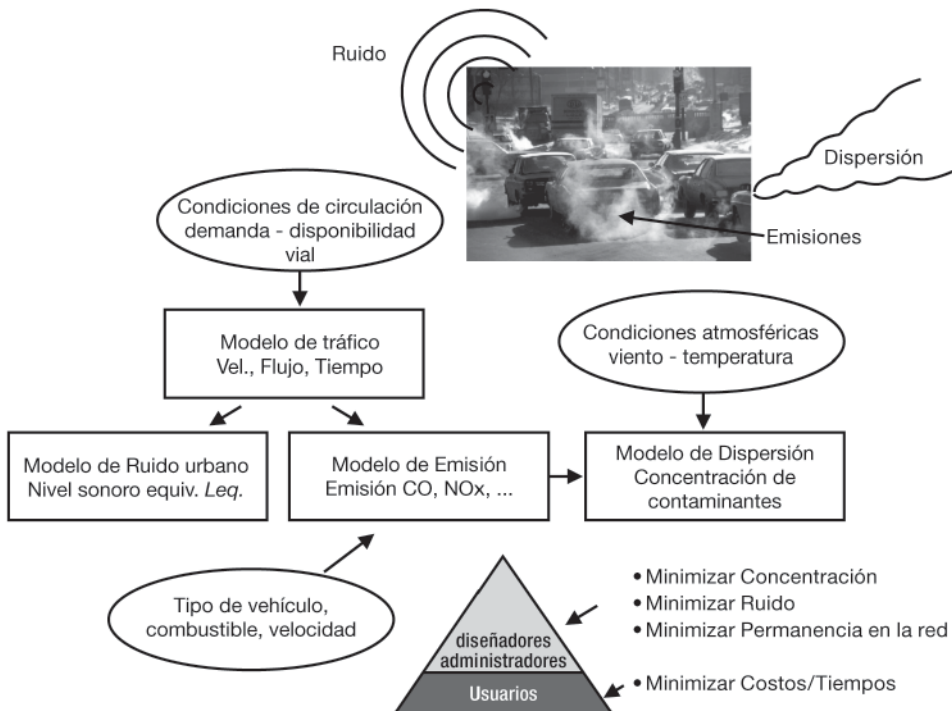


Fig. 1: Modelo general

El modelo es estacionario, es decir, considera que las condiciones de circulación no varían en el intervalo de estudio (hora pico). Durante el recorrido de los distintos tramos que forman la ruta entre origen y destino, los vehículos emiten contaminantes atmosféricos (CO, NOx, etc.) y ruido que dependen del tipo de vehículo, antigüedad, tipo de combustión, características de las calles y velocidad de circulación. Estos contaminantes son dispersados en la atmósfera de acuerdo a las condiciones ambientales, fundamentalmente temperatura y viento y su nivel se puede determinar en los distintos puntos receptores. El modelo general involucra un modelo de optimización de tráfico urbano combinado con un modelo de emisión de contaminantes, un modelo de dispersión y un modelo de ruido urbano.

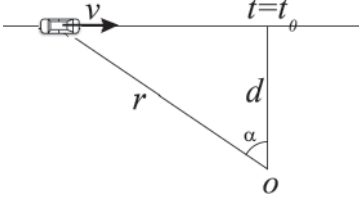
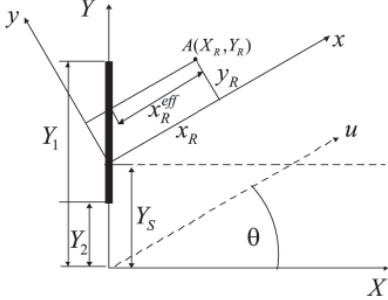
Matemáticamente, el modelo general se define como un programa bi-nivel cuya descripción se puede ver en la Tabla 1. En el nivel superior se plantea la minimización, en una zona, o en toda la red, según el objetivo buscado, de una función que describe la contaminación ya sea sonora o atmosférica o la “optimización del sistema”, sujeta a un conjunto de restricciones de diseño y ambientales. Esta función depende del patrón de flujos y velocidades, solución del nivel inferior, donde se resuelve el “equilibrio de usuario”. La variable Z en el nivel superior representa la variable de diseño que se modifica, por ejemplo la capacidad de expansión de las arterias o la velocidad máxima permitida, A es el conjunto de todas las calles, \bar{A} es el conjunto de arcos de la zona a la que se aplica la función objetivo y $\bar{\mathfrak{R}}$ es el conjunto de receptores de contaminantes. En la Tabla 2 se muestran las funciones que se minimizan en cada uno de los casos estudiados.

Tabla 1: Programación en dos niveles

<p>Nivel superior:</p>	$\min f(Z) = \sum_{a \in \bar{A}} F_a(x_a^*, Z)$ <p>s.a.</p> $Z_a^{\min} \leq Z_a \leq Z_a^{\max} \quad \forall a \in A$ $L_{eqa}(x^*, Z) \leq L_{eqa}^{\max} \quad \forall a \in \bar{A}$ $C_{Re}(x^*, v^*, Z) \leq C_{Re}^{\max} \quad \forall Re \in \bar{\mathfrak{R}}$	<p>Función Objetivo. x_a^*: flujo en el tramo a, solución del nivel inferior</p> <p>Restricción de la variable de diseño</p> <p>Restricción ambiental (nivel sonoro equivalente)</p> <p>Restricción ambiental (concentración de contaminante)</p>
------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Nivel inferior:</p>	$\min z(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega$ <p>s.a.</p> $\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s$ $f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s$ $x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \in A$ $\delta_{a,k}^{rs} = \begin{cases} 1 & \text{Si } a \text{ pertenece a la ruta } k \text{ entre } r \text{ y } s \\ 0 & \text{En caso contrario} \end{cases}$	<p>Función objetivo. Equilibrio de usuario.</p> <p>x_a : flujo vehicular en el tramo a.</p> <p>t_a : tiempo de viaje en el tramo a.</p> <p>Restricción de conservación de flujo.</p> <p>f_k^{rs} : flujo en la ruta k entre origen r y destino s.</p> <p>q_{rs} : viajes entre origen r y destino s.</p> <p>Restricción de flujo positivo.</p> <p>Relación entre el flujo en el tramo y el flujo en la ruta.</p> <p>$\delta_{a,k}^{rs}$: Indicador que relaciona arcos y rutas.</p>
-------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla 2: Funciones objetivas del nivel superior

<p>Estado óptimo del sistema</p>	$\min f(Z) = \sum_{a \in A} x_a^* t_a(x_a^*, Z)$	$t_a = t_{0a} \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a + B_a}{C_a + Z} \right)^\beta \right]$ <p>Función BPR t_{0a} : tiempo a flujo libre en el tramo a. C_a : capacidad original del tramo a. B_a : flujo de colectivos en el tramo a.</p>
<p>Minimización del ruido</p>	$\min f(Z) = \sum_{a \in A} L_{eqa}(x_a^*, Z)$ 	$L_{eq} = 49,4 + 10 \log(A + 2,33 \cdot M + 9,01 \cdot B + 6,84 \cdot C) + 23,266 \cdot x^{-0,3811} - 10 \log d$ <p>A, M, B, C: cantidad de automóviles livianos, motos, ómnibus y camiones respectivamente que circulan por hora. x : flujo total. Si la velocidad supera los 60 km/h se le agrega un término de corrección por velocidad $\Delta v = 0.15 * v - 8,67$.</p>
<p>Minimización de la contaminación atmosférica</p>	$\min f(Z) = \sum_{Re \in \mathbb{R}} C_{Re}(x^*, v^*, Z)$ 	$C(X_R, Y_R) = \frac{E(\text{erf}(u_1) - \text{erf}(u_2))}{\sqrt{2\pi} u \cos \theta \sigma_z^{\text{eff}}}$ $u_i = \frac{(Y_R - Y_i) \cos \theta - X_R \sin \theta}{\sqrt{2} \sigma_y^{\text{eff}}}$ $x_R^{\text{eff}} = \frac{X_R}{\cos \theta} \quad E = \sum_{i=1}^M FE_i \cdot x \cdot pm$ <p>u : velocidad del viento σ_y y σ_z : coeficientes de dispersión en las direcciones lateral y vertical respectivamente. FE : factor de emisión.</p>

3.2 Esquema de solución

En la solución del nivel inferior donde la función objetivo es convexa, se utiliza el método de descenso de Frank-Wolf [4] y en la del nivel superior la técnica heurística *Simulated Annealing*. Esta técnica genera al azar soluciones factibles a partir de una solución inicial. Si la nueva solución es mejor, se acepta y se utiliza para generar una nueva solución. En caso contrario, se acepta de acuerdo a un cierto criterio probabilístico que disminuye la posibilidad de aceptación a medida que avanza el algoritmo y que permite no estancarse en mínimos locales al comienzo del mismo. Cuando el algoritmo termina, de acuerdo a un cierto criterio de parada, la solución obtenida es cercana al valor óptimo global. Los detalles de implementación del programa se pueden ver en Domínguez et al. [2].

4. Aplicación del modelo

Para ejemplificar la metodología descrita, el modelo se aplica a una red de 63 nodos y 220 enlaces, como la mostrada en la Figura 2, que representa las principales vías de circulación de una ciudad hipotética. Cada enlace tiene una longitud de 1000 m entre intersecciones y la circulación es en ambos sentidos sin influencia mutua. Existen inicialmente 3 tipos de arterias de las mostradas en la Tabla 3: las correspondientes al anillo exterior de la ciudad (Grupo 5), las correspondientes a las avenidas principales (Grupo 1) que cruzan la ciudad en direcciones E-O y N-S en ambos sentidos y las que comprenden el resto de las calles (Grupo 4).

Tabla 3: Tipos de calles

Grupo	Arcos	Capacidad original C [veh/h]	$Z_{máx}$ [veh/h]	$Z_{mín}$ [veh/h]	Vel. máx. [km/h]	
1	Av. ppales	5-59, 28-36	1800	1200	0	60
2	Anillo central	11-17-53-47-11	1200	1200	0	60
3	Zona	21-22-40-39-21, 30-31	600-1200	1200	-600	40
4	Otras calles	el resto de los arcos	1200	600	0	40
5	Anillo externo	1-9-63-55-1	2000	0	0	90

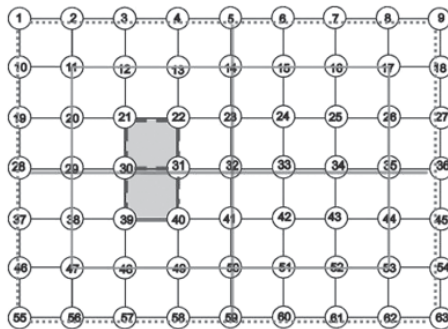


Fig. 2: Red de tránsito

El objetivo es tratar de crear una zona protegida (Grupo 3), que puede corresponder a una zona residencial, disminuyendo los niveles de contaminación acústica y atmosférica. Los nodos 5, 11, 15, 17, 22, 32, 35, 39, 46, 59 y 62 corresponden a los centroides de zonas y son los puntos que generan y atraen viajes según el esquema de la Tabla 4. Se considera que los viajes particulares corresponden a la hora pico de la mañana fundamentalmente ingresando al centro de la ciudad, de los cuales el 10% se realizan en motos y ciclomotores y el 90% restante en automóviles. Del total de autos particulares, el 80% consume nafta y el 20% restante consume gasoil. Se considera además una carga fija de 400 vehículos pesados por hora en el anillo externo, 160 colectivos en las avenidas principales y 80 en el resto de las arterias. Los vehículos pesados y colectivos se toman, para obtener el equilibrio de usuario, equivalentes a 2 automóviles cada uno y las motos a medio automóvil según lo recomendado por el Manual de Capacidad de Carreteras HCM 2000 [8].

Tabla 4: Cantidad de viajes generados y atraídos por los centroides

Nodo	5	11	15	17	22	32	35	39	46	59	62
Genera	4968	5298	5394	5022	4914	3762	5202	4926	5202	5202	5010
Atrae	5220	1920	960	4680	5760	17280	2880	5640	2880	2880	4800

Los coeficientes adoptados para la función BPR (Tabla 2) son los usualmente utilizados en la literatura: $\alpha = 0,15$ y $\beta = 4$. La distancia d utilizada en el cálculo de nivel sonoro equivalente se fija en 5 metros. Se analiza en este trabajo un solo tipo de contaminante, el Monóxido de Carbono (CO), pudiéndose aplicar la misma metodología para cualquier otro contaminante no reactivo. En cuanto a los factores de emisión de los vehículos se utilizan las fórmulas recomendadas por la guía EMEP/CORINAIR 2009 [3]. Las expresiones usadas para cada categoría vehicular son las que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Factores de emisión

Tipo de vehículo	Factor de emisión [g/km]	Fuente	Observaciones
Autos nafteros	$300 * V^{-0.797}$	E MEP-CORINAIR	10-60 km/h
Autos gasoleros	$5.41301 * V^{-0.574}$	E MEP-CORINAIR	10-130 km/h
Motos 4 tiempos > 50 cm ³	20	EEA (1996)	s/modo conducir urbano
Colectivos	17	EEA (1996)	s/modo conducir urbano

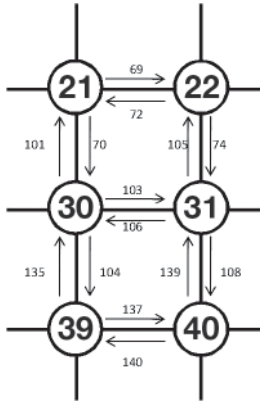
En la aplicación del modelo de dispersión se consideró una situación medianamente desfavorable con velocidad de viento de 2 m/s formando un ángulo de 30° con la dirección O-E. Se adoptaron los coeficientes de dispersión vertical y transversal propuestos por Pasquill para terreno urbano y estabilidad atmosférica clase C: $\sigma_z = 0,2x$ y $\sigma_y = 0,22x(1 + 0,0004x)^{-1/2}$. Los receptores de monóxido de carbono se suponen colocados en las intersecciones a 10 m del centro de la calle.

4.1 Análisis de la situación original y modificaciones intuitivas

Tabla 6: Situación original de la red

Arco	X [veh/hora]	T/T0	V/V0	x/C	Leq [dB]	Q [mg/m s]
69	1619.7	1.50	0.67	1.35	79.5	12.4
70	1543.9	1.41	0.71	1.29	79.9	13.8
72	864.6	1.04	0.96	0.72	79.5	12.4
74	1810.8	1.79	0.56	1.51	80.4	17.7
101	1261.5	1.18	0.85	1.05	79.9	13.8
103	3162.6	2.46	0.41	1.76	81.7	21.6
104	1882.4	1.90	0.53	1.57	80.9	23.6
105	1401.5	1.28	0.78	1.17	80.4	17.7
106	1093.0	1.02	0.98	0.61	81.7	21.6
108	965.7	1.06	0.94	0.80	79.6	12.6
135	1874.0	1.90	0.53	1.56	80.9	23.6
137	1961.7	2.06	0.48	1.63	80.8	22.0
139	1595.1	1.47	0.68	1.33	79.6	12.6
140	1646.3	1.53	0.65	1.37	80.8	22.0

Receptor	C [mg/m ³]
21	3.3
22	5.4
30	5.8
31	9.2
39	6.6
40	6.6



De la resolución del equilibrio de usuario, la situación original de la red en la zona que se estudia presenta las siguientes características:

- Congestión en el enlace entre los nodos 30-31 de la avenida principal con relación $x/C = 1,76$.
- Flujo mayor a 3000 vehículos/h.
- Nivel sonoro equivalente muy alto, con un valor máximo de 81.7 dBA en las calles principales y un valor promedio de 80.4 dBA.
- Alta concentración de CO, $9,2 \text{ mg/m}^3$ en el receptor 31.

Debido a que la concentración de CO depende de la emisión y que ésta es mayor en bajas velocidades, una solución intuitiva es ampliar la capacidad de las calles de la zona, para aliviar la congestión y de esta manera recuperar velocidad. Por otro lado, el ruido es función del flujo y sólo disminuye con la disminución del mismo, por lo tanto otra solución podría ser disminuir la capacidad de las calles y bajar la velocidad máxima para desalentar el tránsito en las mismas, y una tercera opción es eliminar los colectivos de las calles en cuestión. Los resultados obtenidos para estas configuraciones intuitivas de las calles de la zona que se estudia se pueden ver en la parte superior de la Tabla 7 y ellos dan origen a las siguientes observaciones:

- Si se aumenta la capacidad de las calles:
 - el tiempo de recorrido disminuye, los arcos se vuelvan más atractivos para los usuarios y en consecuencia
 - aumenta el flujo y el nivel sonoro en ellos.
 - Las emisiones y las concentraciones en los receptores no varían demasiado, pero en el receptor 31 se supera el valor admisible.
 - La solución no es efectiva para bajar los niveles de contaminación.

- b) Si por el contrario se disminuye la capacidad en 1 carril, es decir se asume $Z = -600$ vehículos/h:
- el flujo disminuye,
 - baja ligeramente el nivel de ruido, aunque no en los arcos más congestionados, pero
 - aumenta mucho el tiempo de permanencia en la red y,
 - la disminución de velocidad hace que aumenten las emisiones y la concentración de CO.

En cuanto a la influencia de los colectivos, se puede apreciar que la eliminación de los mismos da lugar a otros vehículos. Por otro lado, como se puede ver en la Tabla 7 la reducción de capacidad produce un aumento en el tiempo total de permanencia en la red general del 10% aproximadamente.

Lo que se pone de manifiesto en las pruebas anteriores es que la modificación de la capacidad de las calles de la zona que se estudia no basta para producir cambios significativos, lo cual es esperable pues la red de transporte tiene un comportamiento sistémico y en consecuencia es necesario trabajar sobre la totalidad de la misma, o al menos en una zona más amplia, para permitir que el tráfico se equilibre de manera más beneficiosa. Modificar intuitivamente el resto de las calles es una tarea sumamente compleja, de manera que la mejor solución es plantearlo a través de un problema de optimización en la zona involucrando la totalidad de la red. Para ello las calles se reagrupan de acuerdo a las características de la Tabla 3 con la inclusión de un anillo central (Grupo 2).

4.2 Comparación de resultados

En la Tabla 7 se pueden ver algunos valores comparativos para la situación original, las soluciones intuitivas y los resultados obtenidos mediante optimización. La minimización de concentración de monóxido de carbono y la de ruido determinaron modificaciones de la capacidad muy semejantes que a nivel práctico se asumen iguales y se muestran en los dos últimos renglones para los casos en que se considera o no circulación de colectivos. Los valores de Z corresponden en orden a los Grupos 1 a 4. Asimismo en las Figuras 3 a 7 se pueden ver los patrones de flujo, tiempo, nivel sonoro continuo equivalente y emisiones de CO en los arcos de la zona que se pretende proteger y la concentración de CO en los receptores de la misma zona.

Tabla 7: Comparación de resultados

	Red Total			Zona							
	$\Sigma x*t$	Leq máx.	C máx.	$\Sigma x*t$	x/C máx	t/to máx	Leq máx	Leq med.	E total	C máx	C med
Original	609622	84	22.5	52558	1.8	2.45	81.7	80.4	123.6	9.2	6.2
Original sin colec.	587146	84	22.7	40884	2.0	1.56	81.6	80.1	111.9	9.9	5.9
z=600 veh/h	590216	84	22.7	43597	1.4	1.47	82.4	80.7	115.6	10.0	6.0
z=600 veh/h Vmáx=60 km/h	577454	84	22.4	38606	1.4	1.61	81.3	81.8	114.6	9.0	6.1
z=-600 veh/h Vmáx=40 km/h	672169	84	20.9	73028	2.2	4.40	81.1	79.2	132.9	10.2	6.6
Óptimo de Sistema	392933	83.5	12.3	37930	1.1	1.23	80.9	80.3	100.5	6.7	5.0
Min. Cont. c/colec.	424992	83.8	12.0	38476	1.9	2.88	80.2	78.5	79.9	6.3	4.3
Min. Cont. s/colec.	416742	83.7	11.9	35635	1.9	2.80	78.6	77.5	79.7	6.0	4.3

Resultados en la red general al buscar un **óptimo de sistema en la zona** $Z_s = [1200 \ 1200 \ 600 \ 600]$:

- Toda la red se beneficia ya que el tiempo de permanencia disminuye 35,5%, lo cual indica un funcionamiento más fluido.
- La concentración de CO disminuye 54,7% en el receptor más comprometido (32).
- El nivel de ruido no se modifica de forma notable debido a que los valores máximos se producen en el anillo externo y corresponden fundamentalmente a la carga fija de vehículos pesados.

En la zona de estudio:

- El flujo se reduce apenas 3% en promedio, aunque en el enlace más conflictivo alcanza el 15,9%.
- El nivel sonoro equivalente disminuye un máximo de 1,2 dBA y un promedio de 0,11 dBA.
- Es apreciable la disminución de las emisiones que alcanzan un máximo 36,6% y un promedio de 16,7%. Esta mejora en los niveles de emisión (Figura 7) se debe a la mayor fluidez en el tráfico ya que, como puede apreciarse en la Figura 5, bajan los tiempos de recorrido, aumenta la velocidad y en consecuencia disminuye la emisión, a pesar de no disminuir el flujo.

- El nivel máximo de concentración de CO disminuye 27.6%
- El objetivo, de mantener el nivel sonoro equivalente por debajo de 80 dBA en la zona a proteger no se puede alcanzar de esta manera.

Resultados en la zona tanto de la **minimización del nivel sonoro** en la zona en cuestión, como la **minimización de las concentraciones** en los receptores de la zona $Z_s = [1200 \ 1200 - 600 \ 600]$:

- El flujo disminuye en forma acentuada, 44,0 % y 46,5% respectivamente para los casos en que se consideró o no la existencia de colectivos en las calles de la mencionada zona.
- Las emisiones bajan 34,65 % en promedio sin mayores diferencias entre ambas configuraciones
- La concentración de CO, siguiendo el mismo patrón, disminuye 29.6% pero con una reducción máxima en el punto más comprometido del 42 % bajando el nivel original de 9,2 mg/m³ a 5,3 mg/m³.
- El nivel sonoro, el más difícil de modificar, sólo se logra bajar a un máximo de 78,7 dBA eliminando la circulación de colectivos.
- La minimización de la contaminación en la zona estudiada no provoca un aumento de costo demasiado elevado en el resto del sistema ya que sólo aumenta un 6% con respecto al óptimo de sistema.

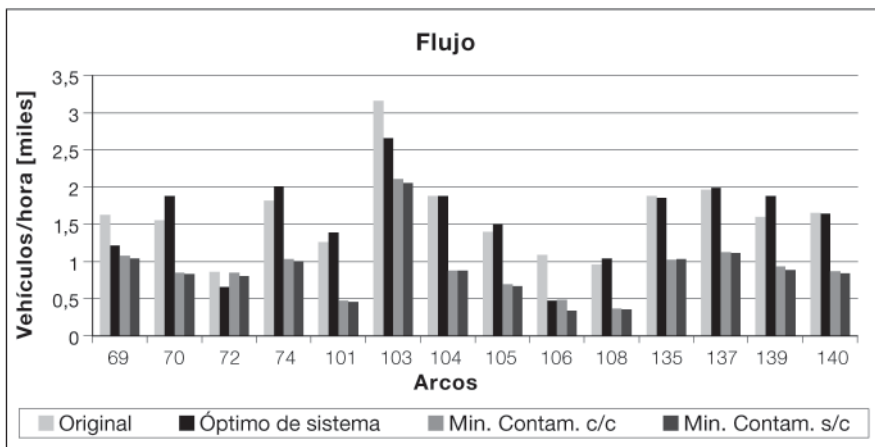


Fig. 3: Flujo vehicular en los arcos de la zona estudiada

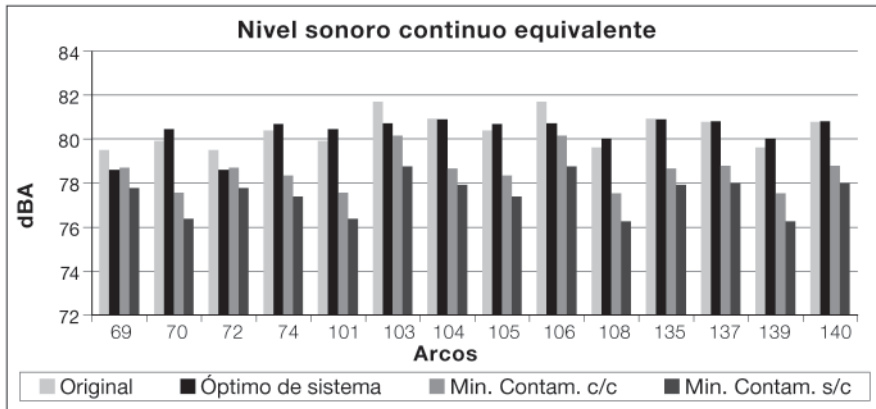


Fig. 4: Nivel sonoro

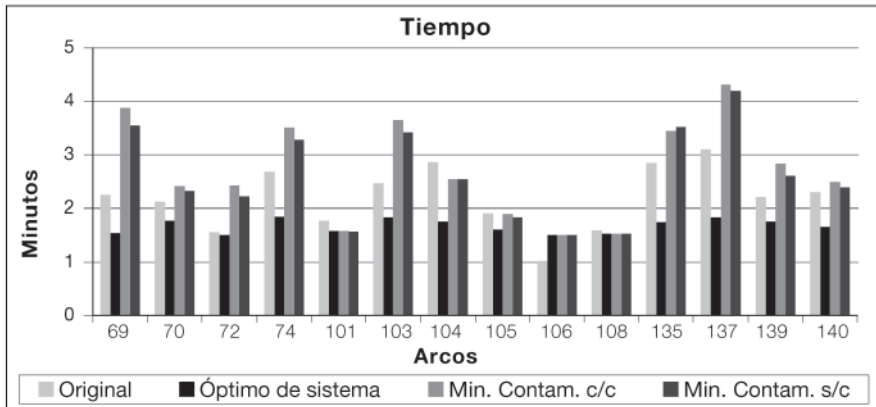


Fig. 5: Tiempo de recorrido de los arcos

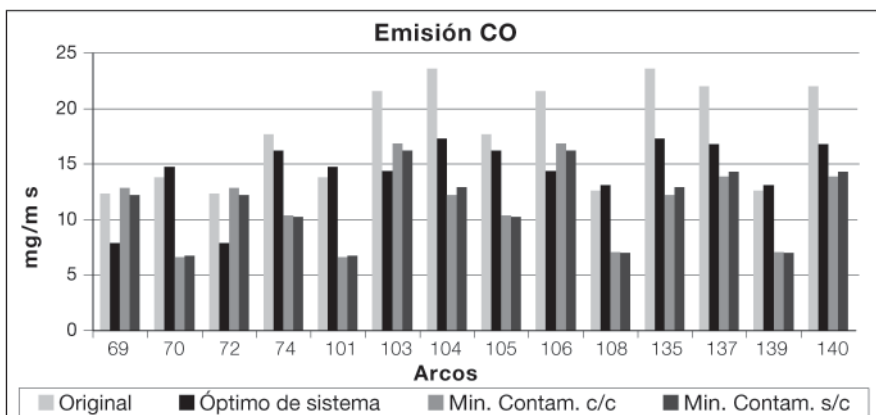


Fig. 6: Emisión de CO

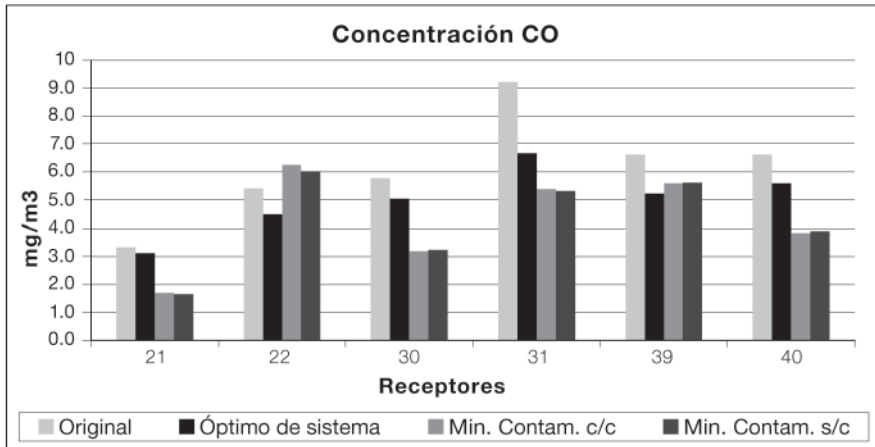


Fig. 7: Concentración de CO

Conclusiones

La aplicación de la modelización matemática permite tratar en forma conjunta el problema del tráfico urbano y la contaminación ambiental que genera.

Como se puede observar de los resultados obtenidos en el ejemplo analizado, las soluciones intuitivas que se suelen aplicar cuando se pretende resolver un determinado problema de tráfico urbano pueden no ser confiables y producir resultados contrarios a los buscados.

Debido a que la red tiene un comportamiento sistémico, para lograr cambios en una zona determinada hay que hacerlos en una zona más amplia o considerando la totalidad de la misma, si es posible.

La programación en dos niveles permite considerar tanto el interés de los usuarios individuales como el de planificadores o entidades que toman decisiones a nivel social.

Un modelo integrado de tránsito y contaminación permite fijar distintos objetivos y obtener resultados que brindan opciones válidas a la hora de tomar decisiones en cuanto a modificar o ampliar una red existente.

Sobre la base de un modelo general resulta sencillo modificar los modelos particulares utilizados en el tratamiento de cada tema, es decir, los modelos de tránsito, ruido, emisiones o dispersión de acuerdo a las características de cada ciudad o problema a tratar. El modelo de tránsito puede modificarse para tener en cuenta la demanda variable, las distintas modalidades de viaje o las distintas percepciones de los usuarios y el modelo de ruido puede reemplazarse con uno particular para una determinada ciudad. Asimismo se pueden adoptar otras funciones de emisión,

evaluar otros contaminantes, distintas condiciones meteorológicas o tener en cuenta efectos no considerados como por ejemplo el efecto cañón en ciudades con calles cerradas, mediante pequeñas modificaciones en los programas particulares.

Si bien en este trabajo se utilizó una sola variable de diseño, la capacidad de expansión, un tratamiento análogo se puede hacer en base a otras variables, por ejemplo la modificación de la velocidad de circulación máxima permitida o la implementación de cobro por peaje, entre otras.

Tener un modelo general que involucra todos los aspectos fundamentales que entran en juego en las cuestiones de tránsito y medio ambiente brinda flexibilidad y mayor confiabilidad en las soluciones obtenidas, sin perder de vista que dichos modelos dependen fuertemente de los datos con que trabajan por lo que resulta fundamental contar con buena información del lugar que se estudia.

Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto “Contaminación acústica en ambientes urbanos e industriales”, SCyT Universidad Tecnológica Nacional.

Referencias

- [1] V. H. Cortínez, C. I. Stoklas, P.G. Girón, A. P. Azzurro, L. Ercoli. Modelos de predicción de ruido de tránsito para la ciudad de Bahía Blanca, Argentina, Proc. V Congreso Iberoamericano de Acústica, Santiago de Chile, Chile, 2006.
- [2] P. N. Dominguez, M. C. Vidal, V. H. Cortínez. Diseño óptimo de redes de transporte urbano considerando aspectos medioambientales. *Mecánica Computacional* Vol. XXVIII, 2599-2624, 2009.
- [3] EMEP/CORINAIR(2009), <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>.
- [4] M. Frank y P. Wolfe. An algorithm for Quadratic Programming, *Naval Research Logistics Quarterly*, 3:95-110, 1956.
- [5] E. Gaja Díaz. Contribución al estudio de un modelo matemático sobre el ruido emitido por el tráfico urbano y los niveles de molestia en el municipio de Valencia, Tesis doctoral ETS11-UPV, España, 1984.
- [6] A. E. González. Contaminación sonora en ambiente urbano: optimización del tiempo de muestreo en Montevideo y desarrollo de un modelo predictivo en un entorno atípico, Tesis doctoral, Montevideo, 2000.

- [7] J. Guldmann, and W. Kim. Urban transportation network design, traffic allocation and air quality control: an integrated optimization approach, *European Regional Science Association*, 36h European Congress, ETH Zurich, Switzerland, 1996.
- [8] Highway Capacity Manual: 2000, Transportation Research Board, 2000.
- [9] P. Marcotte, G. Savard, D. Zhu. Mathematical structure of a bilevel strategic pricing model. *European Journal of Operational Research* 193(2009), 552-566,
- [10] L. Ntziachristos, G. Mellios, G. Fontaras, S. Gkeivanidis, M. Kousoulidou, D. Gkatzoflias, Th. Papageorgiou, Ch. Kouridis. Updates of the Guidebook Chapter on *Road Transport*. LAT Report No 0706:63, 2007.
- [11] H. Poorzahedy, O. Rouhani. Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem. *European Journal of Operational Research* 182 (2007), 578-596.
- [12] S. E. Puliafito. Emissions and air concentrations of pollutant for urban area sources. *Mecánica Computacional*, 24 (2005), 1389-1408.
- [13] T. Sasaki, Y. Iida, H. Yang. User-Equilibrium traffic assignment by continuum approximation of network flow. *Proceedings of the 11th international symposium on transportation and traffic theory*, Japan, (1990), 233-252.
- [14] R. Sivacoumar y K. Thanasekaran. Line source model for vehicular pollution prediction near roadways and model evaluation through statistical analysis. *Environmental Pollution* 104(1999), 389-395.
- [15] L. E. Venegas, N. A. Mazzeo. Modelling of urban background pollution in Buenos Aires city (Argentina). *Environmental Modelling & Software*, 21 (2006), 577-586.
- [16] A. Venkatram, T. Horst. Approximating dispersion from a finite line source. *Atmospheric Environment* 40 (2005), 2401-2408.
- [17] J. G. Wardrop. Some theoretical aspects of road traffic research. *Institution of Civil Engineers II* (1), (1952), 325-378.