
XIII Congreso Argentino de Acústica
VII Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas Vinculadas

Buenos Aires, 29 y 30 de octubre de 2015

AdAA2015-A017

**Evaluación de Impacto Acústico Urbano mediante un
Modelo Integrado de Tráfico y Ruido**

Víctor H. Cortínez^(a,b,c)
Patricia N. Dominguez^(a,b)

(a) Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada, Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional, 11 de Abril 461, 8000 Bahía Blanca, Argentina. E-mail: vcortine@frbb.utn.edu.ar

(b) Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Argentina, E-mail: pdoming@uns.edu.ar.

(c) CONICET

Abstract

In order to analyze the acoustic impact in different areas of a city due to changes in the transport network, such as incorporation of dedicated lanes for public transport or installation of traffic lights, it is necessary to integrate a model to estimate the traffic flow in the arteries of interest with a noise prediction approach. The traffic model is based on the principle of Wardrop which states that drivers choose their route so as to minimize their own travel time and usually involves a mathematical optimization problem of high computational cost. In this paper, a new integrated model for such an assessment is presented. The new model leads to a system of partial differential equations that can be solved numerically in a convenient way with a substantial reduction in computation time. Examples are given to illustrate the efficiency of the proposed method.

Resumen

A efectos de analizar el impacto acústico en diferentes zonas de una ciudad debido a modificaciones en la red de transporte, tales como incorporación de carriles exclusivos para transporte público o instalación de semáforos, es necesario integrar un modelo que permita estimar los flujos vehiculares en las arterias de interés con enfoque de predicción de ruido. El modelo de tráfico se basa en el principio de Wardrop estableciendo que los conductores eligen su ruta de manera tal de minimizar su propio tiempo de viaje. Esto, generalmente involucra un problema de optimización matemática de alto costo computacional. En este trabajo se presenta un nuevo modelo integrado para realizar tal evaluación. El nuevo modelo conduce a un sistema de ecuaciones diferenciales parciales que se resuelven en forma numérica de manera conveniente con una sustancial reducción en los tiempos de cálculo. Se muestran ejemplos que ilustran sobre la eficiencia del método propuesto.

1 Introducción

El tráfico vehicular constituye uno de los problemas más acuciantes en las grandes ciudades. En efecto, la congestión del tráfico produce importantes demoras en los traslados habituales de la población, con efectos negativos desde el punto de vista económico y ambiental. Desde este último, el ruido generado constituye un aspecto de especial preocupación. Por tal motivo, resulta de interés efectuar una predicción de los niveles sonoros generados por tráfico vehicular cuando se realizan diversas modificaciones en la red de transporte (modificaciones de arterias, sentidos de circulación, ampliación de carriles, etc.). Tal predicción sirve para evaluar el impacto acústico como uno de los elementos de importancia, conjuntamente con el efecto de retraso de tiempos de viaje, para emitir un juicio sobre la conveniencia o no de la modificación proyectada.

En tal sentido, una ingente labor de investigación ha sido generada para desarrollar modelos matemáticos que relacionen diversos indicadores de ruido con el flujo vehicular y otras variables asociadas. La metodología más precisa puede basarse en una solución numérica de la ecuación de ondas acústicas (Pasareanu et al., 2012). Sin embargo, la complejidad de la geometría de un cañón urbano así como el trazado de las calles hacen inviable tal alternativa. Una opción apropiada es el uso del método de trazado de rayos (Kang, J., 2002) que permite obtener resultados precisos en el rango de alta frecuencia cuando se modela una región localizada del medio urbano (abarcando unas pocas manzanas). Si se pretende la modelación de una gran porción de la ciudad, o eventualmente la ciudad entera, el costo computacional de la metodología señalada es tremendamente alto, razón por la cual se han desarrollado diversas expresiones empíricas simplificadas (Cortínez et al., 2006; Gonzales, 2000). Estas últimas se basan en fórmulas explícitas de distintos indicadores de ruido, tales como el nivel sonoro continuo equivalente, en función del flujo vehicular, la velocidad media de circulación y algunos parámetros del camino tales como ancho de calle, pendiente, etc.

Más allá de la utilidad de estas fórmulas simplificadas, el hecho de no incorporar de manera más detallada la física de propagación acústica puede conducir a errores de predicción de importancia. Un modelo interesante que balancea adecuadamente la descripción física del fenómeno y la simplicidad del cálculo es aquel desarrollado por Davies y Lyon (1973). Esta teoría considera las principales características geométricas de un cañón urbano así como sus características de absorción y se basa en una teoría de campo reverberante. En su artículo, Davies y Lyon desarrollaron a partir de tal enfoque una fórmula analítica que produjo resultados adecuados para evaluar el ruido vehicular en ciudades. Sin embargo, este modelo puede aún ser utilizado de una manera más efectiva analizándolo desde la perspectiva de un modelo numérico más apropiado. Este aspecto es el que se considera en este artículo.

Está claro que el estudio de ruido vehicular debe ser tratado en forma conjunta con el problema de tráfico, es decir, la predicción del impacto sonoro debe ir necesariamente precedida por la estimación del flujo vehicular resultante de alguna modificación realizada en la red de transporte. En consecuencia, resulta imprescindible comprender la teoría del tráfico vehicular.

La teoría que permite efectuar una predicción de flujos vehiculares en diferentes tramos de una red de transporte al efectuar diferentes cambios se basa en el primer principio de Wardrop. Éste establece que el comportamiento social de los conductores al seleccionar su propio camino es la intención de minimizar su tiempo de viaje (al menos esto es así para los viajes realizados en forma frecuente). Este principio conduce a un problema de optimización de gran escala tal como el formulado por Beckmann et al. (1956) que permite determinar los

flujos en diferentes arterias conociendo la cantidad de viajes que deben realizarse entre diferentes orígenes y destinos dentro de una ciudad así como la infraestructura disponible.

La solución numérica requerida para analizar ciudades grandes requiere un gran esfuerzo computacional (Dominguez et al., 2009). Por tal motivo, se han desarrollado nuevos modelos que conciben a la red de transporte de una ciudad como un medio continuo equivalente. Esta alternativa puede formularse a partir de un sistema de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales que puede ser ventajosamente resuelto mediante conocidas técnicas computacionales tales como el método de elementos finitos.

Entre los modelos continuos desarrollados pueden citarse los de Sasaki et al. (1990) y las extensiones desarrolladas por Wong y Sun (2001) y Ho et al. (2003, 2006). Una característica implícita en estos modelos es que no existe una clara correspondencia con los modelos de optimización discretos y por otra parte no tienen en cuenta las posibles características anisótropas de una red de transporte urbano. Recientemente se ha desarrollado un nuevo modelo de tráfico que contempla dichos aspectos (Cortínez y Dominguez, 2013) que a su vez ha sido generalizado para considerar ciudades con autopistas (Dominguez y Cortínez, 2011) que se ha utilizado como base para diseño óptimo de redes de transporte (Dominguez y Cortínez, 2012).

En este trabajo se presenta un modelo integrado para el estudio de tráfico y el consecuente efecto acústico urbano. El modelo de tráfico se basa en una nueva formulación de aquel presentado por Cortínez y Dominguez (2013). Esta nueva formulación puede resultar de mayor claridad conceptual respecto de enfoques previos. A partir de esta teoría es posible determinar la densidad de vehículos y las velocidades medias en diferentes arterias de una ciudad. Tales valores, conjuntamente con adecuadas fórmulas de emisión acústica, permiten alimentar un modelo de propagación sonora basado en la teoría de Davies y Lyon (1973) a los efectos de determinar los niveles de presión sonora en diferentes localizaciones dentro de una ciudad. Ambos problemas, el de tráfico y el de ruido, se resuelven por el método de Elementos Finitos. El presente enfoque constituye una mejora respecto a un trabajo previo desarrollado por los autores (Cortínez y Dominguez, 2009) ya que aquí se utiliza un modelo de tráfico más preciso y se resuelve numéricamente el modelo acústico para geometrías urbanas y distribuciones arbitrarias de flujos vehiculares.

En la sección 2 se presenta el desarrollo de la teoría de tráfico congestionado, en la sección 3 se exponen los principales elementos del modelo acústico de Davies y Lyon, en la sección 4 se comentan los aspectos salientes de la solución numérica desarrollada y se muestran algunos ejemplos a fin de ilustrar acerca de las posibilidades del enfoque propuesto y en la sección 5 se comentan las conclusiones generales.

2 Modelo de tráfico urbano congestionado

Uno de los datos de mayor importancia al estudiar el tráfico urbano corresponde al número de viajes que se realiza en un horario determinado entre distintos puntos de la ciudad. Tal información puede ser recabada a partir de encuestas domiciliarias o en ruta. A partir de aquí se pretende establecer cómo se distribuye el tráfico en las diferentes arterias de la red de transporte. Para redes descongestionadas esta estimación se realiza de manera simple, puesto que los usuarios adoptan generalmente el camino más corto para efectuar sus viajes frecuentes. Sin embargo, si la red se congestiona, ocurrirán demoras en la circulación que serán tanto mayores en las calles con mayor cantidad de vehículos. Por dicha razón, los usuarios buscan caminos alternativos con la intención de minimizar el tiempo de viaje. Cuando se llegue al equilibrio, se puede suponer con suficiente aproximación que los caminos

seleccionados corresponden a aquellos que minimizan el tiempo de viaje de los conductores. Tal descripción se denomina “Primer Principio de Wardrop” (Wardrop, 1952). Por lo tanto, en condiciones de congestión, la estimación de los flujos de tráfico en cada arteria es un problema complejo ya que depende de la distribución de vehículos que existen en la red, que a su vez depende de la elección de ruta llevada a cabo por los usuarios. Tal problema se denomina asignación de tráfico en una red de transporte. A continuación se presenta un modelo para describir matemáticamente tal situación en una red densa de calles correspondientes a una ciudad.

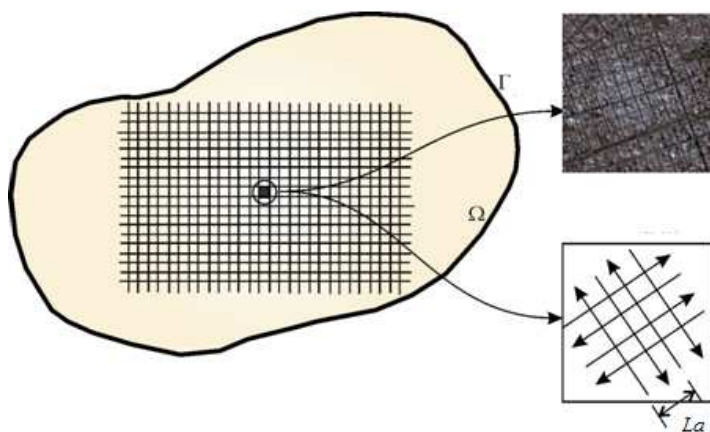


Figura 1. Esquema de red de transporte urbano.

2.1 Función de congestión

El efecto de la congestión, es decir, de la cantidad de vehículos circulando por una arteria a , puede medirse a través del tiempo necesario t_a para transitar la misma (por ejemplo, una cuadra). Se determina empíricamente que, en general, este tiempo aumenta conforme lo hace el flujo horario de vehículos por tal tramo \bar{F}_a (veh/h). La expresión empírica correspondiente tiene la siguiente forma general (Sheffi Y., 1985):

$$t_a = t_a(\bar{F}_a) \quad (1)$$

Ésta corresponde a una función creciente tal como la que se muestra en la figura 2.

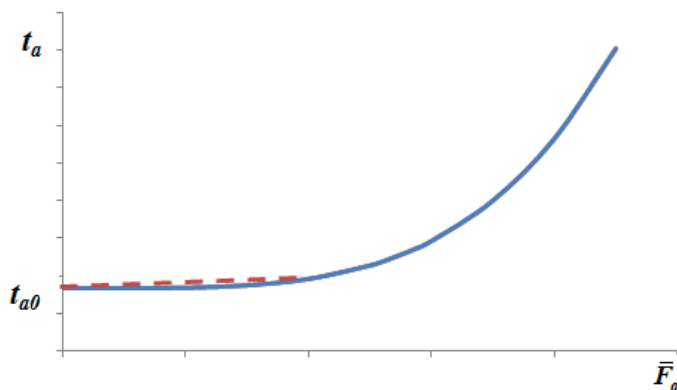


Figura 2. Tiempo de circulación en función del flujo vehicular (función de costo).

Es útil definir el incremento de tiempo de circulación τ_a de la siguiente manera:

$$\tau_a = t_a - t_{a0} \quad (2)$$

donde, t_a y t_{a0} corresponden a los tiempos de circulación en condiciones de congestión y para flujo libre (cuando sólo un vehículo circula por el tramo) respectivamente. Utilizando la última definición es posible invertir la expresión (1) para obtener el flujo en el tramo en función del incremento de tiempo en el tramo:

$$\bar{F}_a = \bar{F}_a(\tau_a) \quad (3)$$

\bar{F}_a es la tasa horaria total de vehículos circulando en el tramo. La expresión (3) será denominada “función de congestión”. Tiene sentido individualizar dentro de este flujo aquel que se dirige a un destino particular c . Esto quiere decir que el flujo total será la suma de aquel que corresponde a los vehículos dirigiéndose hacia el centro c , F_a y los que no lo hacen F_{Ra} . A éstos últimos se los denominará flujos residuales con respecto al centro c . Así, es posible expresar el flujo horario de los vehículos que se dirigen hacia el centro c a través del tramo a como una función del incremento en el tiempo de circulación y del flujo horario residual (del resto de los vehículos):

$$F_a = \bar{F}_a(\tau_a) - F_{Ra} \quad (4)$$

Existen diferentes fórmulas empíricas para expresar (4) explícitamente. En particular aquí se utilizará una modificación de la conocida fórmula BPR (U.S. Bureau of Public Roads, 1964):

$$F_a = R \tau_a^\beta - F_{Ra} \quad (5)$$

donde:

$$R = \begin{cases} \frac{C_a}{(\alpha_a t_{a0})^{1/\varphi_a}} \tau_1^{(1/\varphi_a - 1)} & \tau < \tau_1 \\ \frac{C_a}{(\alpha_a t_{a0})^{1/\varphi_a}} & \tau \geq \tau_1 \end{cases} \quad \beta = \begin{cases} 1 & \tau < \tau_1 \\ 1/\varphi_a & \tau \geq \tau_1 \end{cases} \quad (6)$$

C_a se denomina capacidad efectiva del tramo a , α_a y φ_a son coeficientes que se ajustan de manera empírica, τ_1 es aproximadamente igual a $1,1\alpha_a t_{a0}$.

La modificación realizada consiste en utilizar la recta que se muestra en línea de trazos en la figura 2 para evitar problemas numéricos, sin modificar los valores desde el punto de vista práctico.

2.2 Equilibrio de usuario

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el primer principio de Wardrop (Sheffi Y., 1985), también denominado “Equilibrio de usuario” establece que la trayectoria elegida por un conductor en una red congestionada es tal que su tiempo de viaje hasta el punto de destino será mínimo. Esto también puede interpretarse como que el tiempo de viaje entre un punto dado y el punto de destino por cualquier camino realmente utilizado será el mismo (y el mínimo posible). Luego, una manera alternativa de formular el primer principio de Wardrop es postular que, en condiciones de equilibrio, el tiempo de viaje desde un punto (x,y) de la red de transporte hacia el destino c será solamente función de la localización del usuario y no de la trayectoria empleada. En consecuencia, el tiempo de viaje de equilibrio desde un punto (x,y) hasta un centro c se puede expresar de la siguiente manera: $u=u(x,y)$.

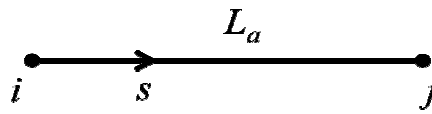


Figura 3. Esquema de un tramo genérico de la red de transporte.

Luego, cuando un conductor recorre un tramo de longitud L_a al dirigirse hacia su destino, el tiempo de recorrido del tramo será igual a la diferencia entre los valores que adopta la función u en los puntos inicial y final del mismo, i y j respectivamente (figura 3), es decir:

$$t_a = u_i - u_j \quad (7)$$

Si, por otra parte, el tiempo de viaje entre un punto dado y el correspondiente destino a flujo libre (sin congestión) se expresa como $u_o(x,y)$, el tiempo de recorrido de un tramo de la red a flujo libre puede ser escrito de la siguiente manera:

$$t_{a_0} = u_{i_0} - u_{j_0} \quad (7')$$

Se define ahora, la función $v(x,y)$ que expresa el tiempo de retraso para un usuario que se dirige desde un punto (x,y) hacia su destino como la diferencia entre los tiempos correspondientes a congestión y a flujo libre:

$$v(x, y) = u(x, y) - u_0(x, y) \quad (8)$$

De las expresiones anteriores y asumiendo que la función v puede ser expresada como una función continua es posible escribir la función de incremento de tiempo de circulación por tramo de la siguiente manera:

$$\tau_a \cong -\frac{\partial v_a}{\partial s} L_a \quad (9)$$

Considerando las expresiones (5) y (9) es claro que el flujo vehicular hacia un cierto destino queda expresado en función de v .

2.3 Conservación de la cantidad de vehículos

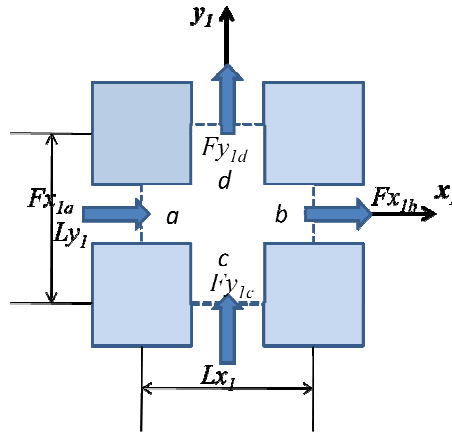


Figura 4. Celda de la red de transporte.

Está claro que la cantidad de vehículos dirigiéndose hacia un centro es conservativa. Es decir que en un área determinada de una ciudad la tasa de vehículos entrante menos la tasa de vehículos salientes, más la cantidad de vehículos Q (viajes generados por unidad de tiempo hacia un centro determinado) que salen de los estacionamientos a la vía pública debe ser nula. A continuación se aplicará tal principio de conservación en la celda de la figura 4. Las longitudes de esta celda, L_{x1} y L_{y1} abarcan las longitudes $2l_{x1}$ y $2l_{y1}$, es decir 2 veces la longitud de una cuadra. Esto es así ya que se está suponiendo que el flujo posible se dirige de Oeste a Este (x_1) y de Sur a Norte (y_1) y que el entramado de calles es tal que una cuadra va en un sentido y la contigua en sentido opuesto.

La ecuación de conservación puede ser expresada de la siguiente manera:

$$F_{x1a} - F_{x1b} + F_{y1c} - F_{y1d} + Q = 0 \quad (10)$$

Dividiendo esta expresión por el área de la celda $L_{x1}L_{y1}$ se llega a:

$$\frac{f_{x1a} - f_{x1b}}{L_{x1}} + \frac{f_{y1c} - f_{y1d}}{L_{y1}} + q = 0 \quad (11)$$

donde se ha definido:

$$f_{x1} = \frac{F_{x1}}{L_{y1}}; \quad f_{y1} = \frac{F_{y1}}{L_{x1}}; \quad q = \frac{Q}{L_{x1}L_{y1}} \quad (12)$$

Estas magnitudes se pueden interpretar como densidades de flujo en las direcciones x_1 e y_1 respectivamente (cantidad de autos por unidad de tiempo y de longitud) y densidad de generación de viajes respectivamente.

Si se considera que L_{x1} y L_{y1} son cantidades muy pequeñas respecto de las dimensiones de la ciudad entera, es posible suponer que (11) es la expresión en diferencias finitas de la siguiente ecuación diferencial:

$$-\left(\frac{\partial f_{x_1}}{\partial x_1} + \frac{\partial f_{y_1}}{\partial y_1}\right) + q = 0 \quad (13)$$

Luego, reemplazando la ecuación (9) en la (5) y el resultado en la (12) es posible escribir las siguientes expresiones para la densidad de flujo:

$$f_{x_1} = -K_1 \frac{\partial v}{\partial x_1} - f_{R_1} \gamma_1 \quad (14)$$

$$f_{y_1} = -K_2 \frac{\partial v}{\partial x_2} - f_{R_2} \gamma_2$$

$$K_1 = \frac{R_1}{L_{y_1}} L_{x_1}^\beta \left| \frac{\partial v}{\partial x_1} \right|^{\beta-1} \quad K_2 = \frac{R_2}{L_{x_1}} L_{y_1}^\beta \left| \frac{\partial v}{\partial x_2} \right|^{\beta-1} \quad (15)$$

Los coeficientes γ_1 y γ_2 se agregan para tener en cuenta el hecho de que el flujo residual en sentido x_I puede existir solamente si tiene el mismo sentido que f_{x_I} . En consecuencia tales coeficientes pueden expresarse como sigue:

$$\gamma_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } \operatorname{sgn}\left(-\frac{\partial v}{\partial x_1}\right) = \operatorname{sgn}(f_{R_1}) \\ 0 & \text{si } \operatorname{sgn}\left(-\frac{\partial v}{\partial x_1}\right) \neq \operatorname{sgn}(f_{R_1}) \end{cases} \quad \gamma_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } \operatorname{sgn}\left(-\frac{\partial v}{\partial x_2}\right) = \operatorname{sgn}(f_{R_2}) \\ 0 & \text{si } \operatorname{sgn}\left(-\frac{\partial v}{\partial x_2}\right) \neq \operatorname{sgn}(f_{R_2}) \end{cases} \quad (16)$$

Debe observarse que las expresiones anteriores conservan su validez aún cuando el flujo se dirija hacia la izquierda o hacia abajo teniendo en cuenta que en tales casos la celda urbana debe ser dibujada abarcando las calles con los sentidos adecuados. En definitiva, el sentido adecuado lo da el signo de las derivadas de v con respecto a x_I e y_I .

2.4 Ecuación general de tráfico

En el caso general, una ciudad está conformada por diferentes regiones en las cuales el trazado de las calles puede modificar su orientación. Por consiguiente es necesario expresar la ecuación de conservación con respecto a un sistema de coordenadas arbitrario x - y . La relación entre el sistema arbitrario x - y y el sistema principal x_I - y_I en una región dada se puede expresar de la siguiente manera (ver figura 5):

$$\begin{cases} x = x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta \\ y = x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta \end{cases} \quad (17)$$

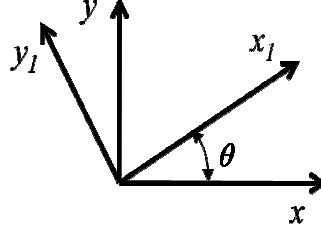


Figura 5. Sistemas de coordenadas local y general.

Sustituyendo (14) en (13) y expresando la ecuación resultante respecto a x e y con ayuda de la transformación (17) se obtiene la ecuación general (18). Dicha ecuación está sujeta a las condiciones de borde (19):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{cx} \frac{\partial v_c}{\partial x} + K_{cxy} \frac{\partial v_c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{cxy} \frac{\partial v_c}{\partial x} + K_{cy} \frac{\partial v_c}{\partial y} \right) + q_c + q_{Rc} = 0 \quad (18)$$

$$\begin{cases} v_c|_{(x_c, y_c)} = 0 \\ \left((K_{cx} v_{cx} + K_{cxy} v_{cy}) n_x + (K_{cxy} v_{cx} + K_{cy} v_{cy}) n_y \right) \Big|_{\Gamma} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

En las ecuaciones anteriores se ha utilizado el subíndice c para indicar el centro de destino que se está considerando pudiendo haber un número N de tales centros ($c=1,2,\dots, N$).

Las condiciones de borde (19) implican que, por definición en el destino c , $v_c=0$, mientras que en el borde externo Γ se supone que no hay flujo que se dirija hacia el destino considerado. En la última condición n_x y n_y son los cosenos directores del versor normal a la curva perimetral Γ .

Las funciones que figuran en la ecuación (18) están definidas de la siguiente manera:

$$q_{Rc} = \frac{\partial f_{cR_1} \gamma_1}{\partial x_1} + \frac{\partial f_{cR_2} \gamma_2}{\partial x_2} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} K_{cx} &= K_{c1} \cos^2 \theta + K_{c2} \sin^2 \theta \\ K_{cy} &= K_{c1} \sin^2 \theta + K_{c2} \cos^2 \theta \\ K_{cxy} &= (K_{c1} - K_{c2}) \cos \theta \sin \theta \end{aligned} \quad (21)$$

Tales coeficientes, pueden ser denominados permeabilidades en analogía a flujos en medios porosos. Los coeficientes de permeabilidad principales K_{c1} y K_{c2} se determinan mediante las expresiones (15) con la ayuda de las siguientes fórmulas (en las cuales se utiliza la siguiente notación: $v_x = \frac{\partial v}{\partial x}$, $v_y = \frac{\partial v}{\partial y}$):

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial v_c}{\partial x_1} \right| &= |v_{cx} \cos \theta + v_{cy} \sin \theta| \\ \left| \frac{\partial v_c}{\partial y_1} \right| &= |-v_{cx} \sin \theta + v_{cy} \cos \theta| \end{aligned} \quad (22)$$

Para N centros de destino, (18-19) constituye un sistema acoplado de N ecuaciones diferenciales no lineales. La no linealidad reside en el hecho de que K_{c1} , K_{c2} , γ_1 y γ_2 son dependientes de las derivadas de las funciones incógnita v_c .

Una vez determinadas las funciones v_c pueden recuperarse los flujos vehiculares F_a en cada una de las arterias mediante las expresiones (9) y (5).

Por otra parte, teniendo en cuenta que la definición de flujo vehicular es el producto de la densidad longitudinal y la velocidad media ($Vel = L_a/t_a$), es posible escribir para el flujo vehicular en un tramo a que se dirige hacia el centro c , la siguiente expresión:

$$F_c = dens_c \times Vel \quad (23)$$

De aquí es posible despejar la densidad vehicular longitudinal de los vehículos hacia el centro c , $dens_c$. Por ejemplo, para un tramo en la dirección x_1 la densidad vehicular adopta la forma:

$$dens_c = \frac{\left(t_0 - \frac{\partial v_c}{\partial x_1} \right) F_{cx_1}}{L_{x_1}} \quad (24)$$

Luego, en una celda urbana dada, el número de vehículos puede ser expresado como:

$$v = \sum_{c=1}^N dens_{1c} l_{x_1} + dens_{2c} l_{y_1} \quad (25)$$

siendo l_{x1} y l_{y1} las longitudes de las cuadas.

Si el patrón urbano considerado fuera de 2 calles en un sentido, intercalas con 2 calles en sentido opuesto, la correspondiente derivación de las ecuaciones sigue pasos similares a los explicados, siendo las ecuaciones resultantes idénticas a las expuestas aunque $L_{x1}=4l_{x1}$ y

$L_{yI}=4l_{yI}$. También pueden considerarse patrones de calles más complejos siguiendo la metodología desarrollada en Cortínez y Domínguez (2013).

3 Modelo de Ruido urbano: teoría de Davies y Lyon

Davies y Lyon (1973), desarrollaron un modelo acústico aplicable a espacios semiconfinados teniendo en cuenta el efecto de barreras, que en el caso de una ciudad, por ejemplo, pueden corresponder a las paredes de los edificios. Asumen que la zona de fuentes, puede ser modelada como una región particionada en celdas cuadradas de lado L y altura h tal como se muestra en la figura 6 (si las longitudes de las cuadradas en las direcciones perpendiculares fueran diferentes, L corresponde al promedio de ambas).

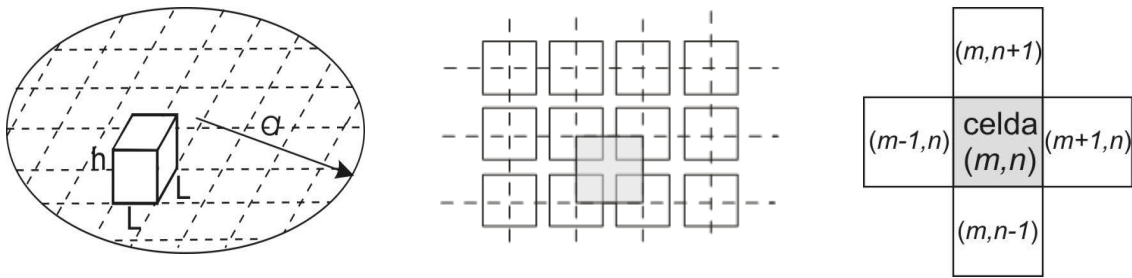


Figura 6. Región de fuentes sonoras y celdas del modelo de Davis y Lyon.

Las celdas contienen las fuentes y sus paredes son semipermeables al sonido, es decir que reflejan, absorben y transmiten el mismo. Las paredes están caracterizadas por los coeficientes de absorción α_s y de transmisión τ_s , siendo el coeficiente de reflexión $(1 - \alpha_s - \tau_s)$. El piso de las celdas se considera un reflector perfecto y el techo un absorbedor perfecto. Se define además un coeficiente efectivo de absorción $\bar{\alpha}$ para la celda que puede ser medido experimentalmente.

$$\bar{\alpha} = \frac{L^2 + 4Lh\alpha_s}{A_t} \quad (26)$$

donde

$$A_t = 2L^2 + 4Lh \quad (27)$$

El nivel de ruido dentro de la celda es el resultado del campo directo debido a las fuentes que se encuentran dentro de la misma y del campo reverberante generado por las reflexiones en las barreras y la transmisión a través de las mismas desde y hacia las celdas vecinas. Se asume que las celdas son semejantes y que el nivel sonoro es constante dentro de la celda.

Bajo tales hipótesis efectuando un balance energético es posible obtener una ecuación para determinar la presión sonora correspondiente al campo reverberante. Tal ecuación, conjuntamente con la condición de borde que expresa la nulidad de la energía en el contorno de la ciudad, puede escribirse de la siguiente manera (Cortínez y Domínguez, 2009):

$$\left(\frac{L\tau_s}{4\rho c} \right) \nabla^2 p^2 - p^2 \left(\frac{\bar{\alpha}}{4\rho c} \frac{A_t}{L^2 h} \right) + \frac{vw}{L^2 h} (1 - \bar{\alpha}) = 0 \quad (28)$$

$$p^2|_{\Gamma} = 0 \quad (29)$$

donde ρ es la densidad del aire, c : la velocidad del sonido en el aire, v : la cantidad de vehículos en la celda, w : la potencia acústica de cada vehículo y ∇^2 el operador laplaciano.

Luego, el campo sonoro dentro de la celda con barreras resulta de la contribución del campo reverberante más el aporte del campo directo p_D^2 . Para este último se utiliza una fórmula determinada por Shaw y Olson (1972) suponiendo fuentes uniformemente espaciadas en la celda. Consecuentemente, el campo sonoro total puede ser expresado de la siguiente manera:

$$p_T^2 = \frac{\rho c v w}{2L^2} (2 + \ln v) + p^2 \quad (30)$$

Por último, el nivel de presión sonora puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$L_p = 20 \log \frac{p_T}{p_{ref}} \quad \text{con } p_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \quad (31)$$

Es interesante comentar que una teoría de campo reverberante no uniforme con ecuaciones gobernantes similares a (28) han sido empleadas recientemente para analizar la acústica de recintos industriales (Sequeira y Cortínez, 2012, 2016). Asimismo, un enfoque similar está siendo investigado para el análisis de la distribución de ruido en cañones urbanos (Picaut, 2002; Pasareanu, 2012).

4 Implementación computacional y ejemplos

4.1 Implementación computacional

El problema consiste en obtener los flujos vehiculares en cada arteria a partir del conocimiento de la infraestructura de transporte (trazado de calles, coeficientes R y β para cada arteria de la fórmula (6)), densidad de viajes hacia los diferentes centros q_c , y localización de los centros de destino (x_c, y_c) . Para ello debe resolverse el sistema (18-19) (N ecuaciones acopladas) y posteriormente determinar el número de vehículos y la velocidad de circulación con las expresiones (23-25). Una vez determinados el número de vehículos en cada celda urbana y la velocidad de circulación, puede obtenerse la presión sonora correspondiente al campo reverberante mediante la solución del sistema (28-29), para lo cual hay que conocer los coeficientes de absorción y de transmisión $\bar{\alpha}$ y τ_s y la potencia acústica w de cada vehículo. Finalmente, el nivel de presión sonora en las diferentes arterias puede obtenerse mediante la expresión (31)

La parte más compleja de este cálculo corresponde a la resolución de los problemas de contorno (18-19) y (28-29). Para dicha tarea, tales problemas se implementan en el programa

de elementos finitos FlexPDE (2015). Dicha herramienta computacional permite resolver tanto los problemas de contorno aludidos como realizar el post proceso para determinar los flujos, velocidades y niveles sonoros. Detalles de implementación pueden consultarse en Dominguez (2013).

4.2 Ejemplos numéricos

El modelo de tráfico dado por las ecuaciones (18-19) tiene una expresión ligeramente diferente a la presentada por los autores en Cortínez y Dominguez (2013) aunque es equivalente a aquella. En aquel trabajo se han comparado numéricamente resultados para diferentes problemas de tráfico obtenidos mediante la teoría aquí presentada y el enfoque discreto clásico. Dichas comparaciones han demostrado que la precisión es básicamente la misma aunque el tiempo de cálculo mediante el presente modelo es mucho menor.

A manera de ejemplo sobre la precisión de la solución numérica mediante elementos finitos se presenta aquí una comparación para una ciudad ideal circular con calles radiales con un solo centro. Es posible determinar la solución analítica de dicho problema expresando la ecuación (18) en coordenadas cilíndricas (Dominguez, 2013). Los datos para tal ciudad son los siguientes: Radio: 10 km, capacidad de las calles: $C_a=400$ veh/h, $\phi_a=4$, $\alpha_a=0,15$, $V_{a0}=60$ km/h. En el cálculo del nivel sonoro se adoptan los siguientes valores: coeficiente de absorción $\alpha_s=0,2$, coeficiente de transmisión: $\tau_s=0,1$, densidad del aire: $\rho=1,2$ kg/m³, velocidad del sonido: $c=345$ m/s, altura de edificios: $h=5$ m, longitud de cuadra: $L=100$ m y potencia emitida por los vehículos: $w=0.01$ W.

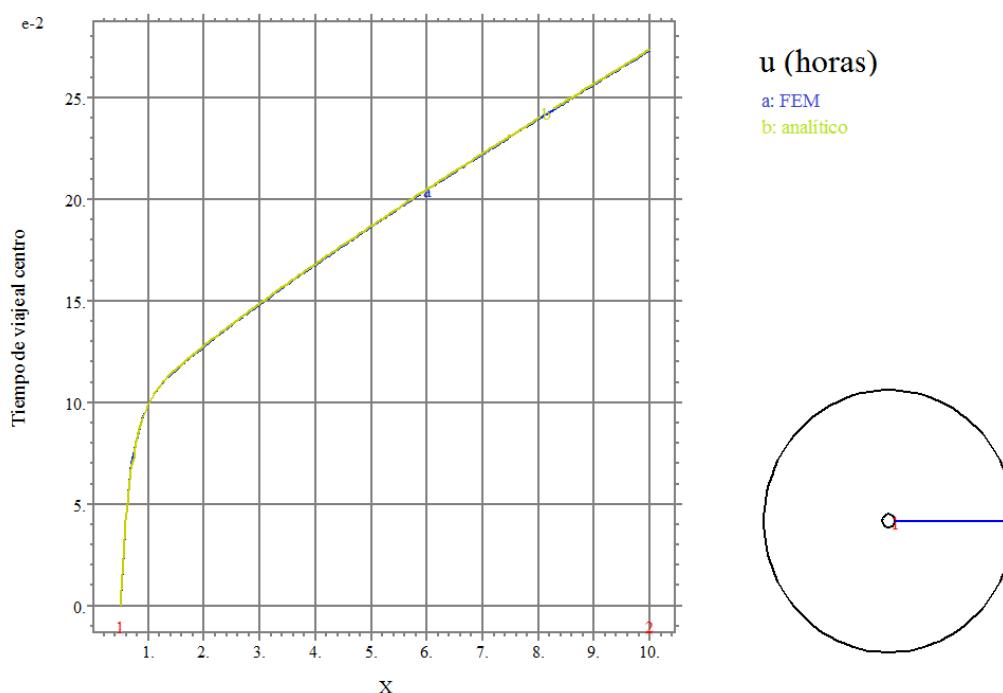


Figura 7. Tiempo de viaje hasta el centro.

En las figuras (7) a (9) se muestran los resultados obtenidos para el tiempo de viaje hasta el centro, el flujo vehicular en las calles radiales y el tiempo de recorrido del tramo (2 cuadras).

Por otra parte, en la figura (10) se muestra la comparación del nivel de presión sonora obtenido mediante elementos finitos y una solución analítica (obtenida a partir de la ecuación (18) en coordenadas cilíndricas).

En dichas figuras es posible observar que los resultados numéricos son prácticamente indistinguibles de los obtenidos analíticamente.

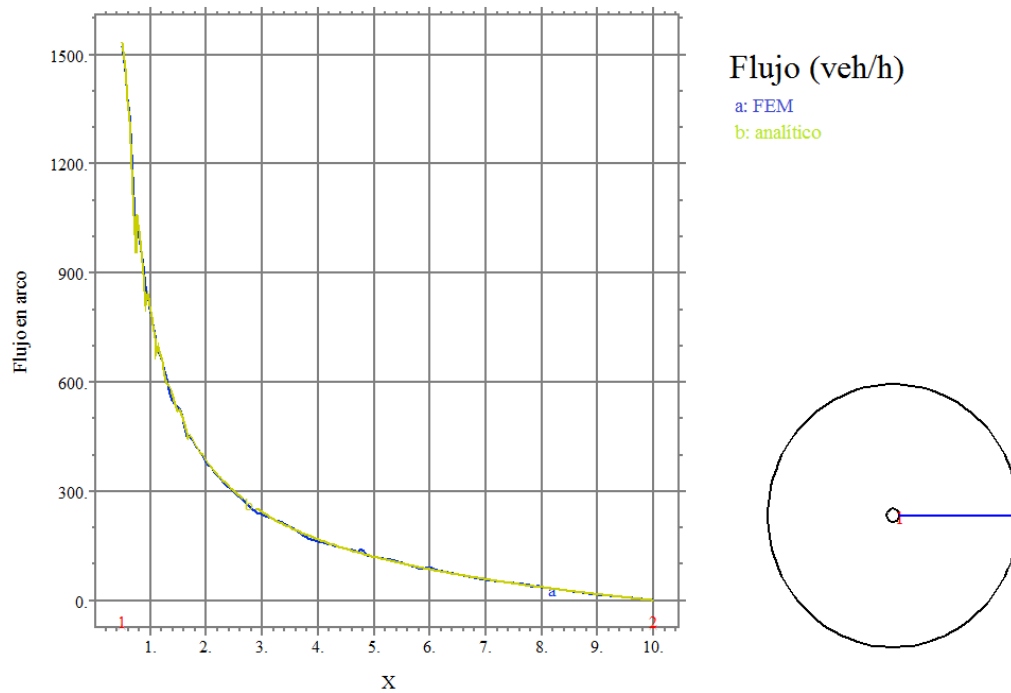


Figura 8. Flujo en las calles radiales.

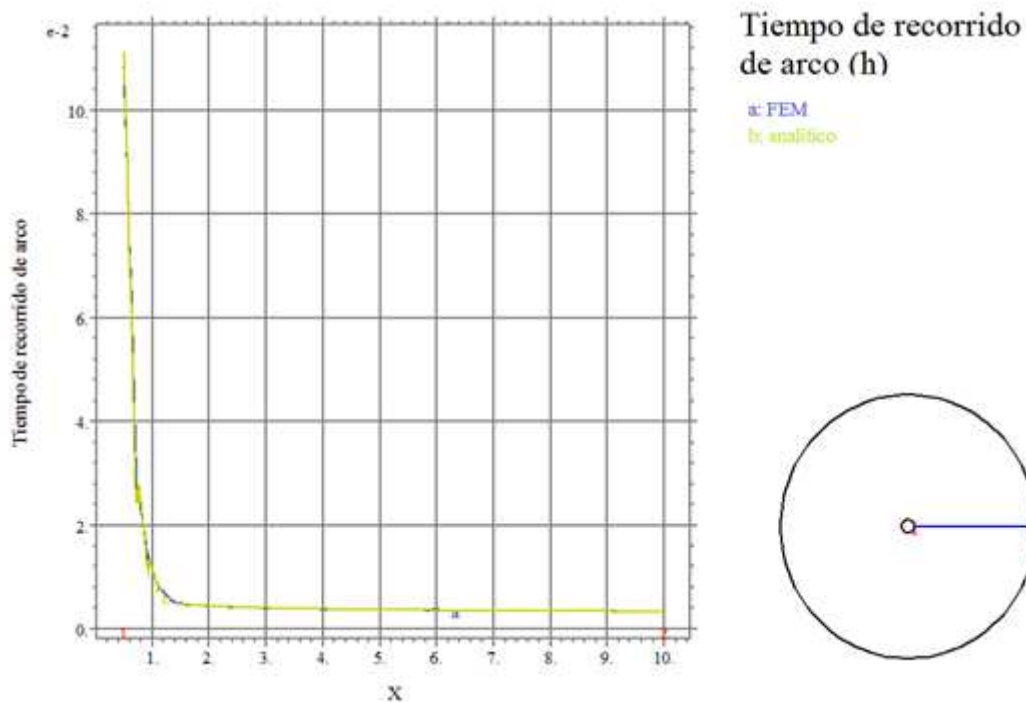


Figura 9. Tiempo de recorrido de los arcos.

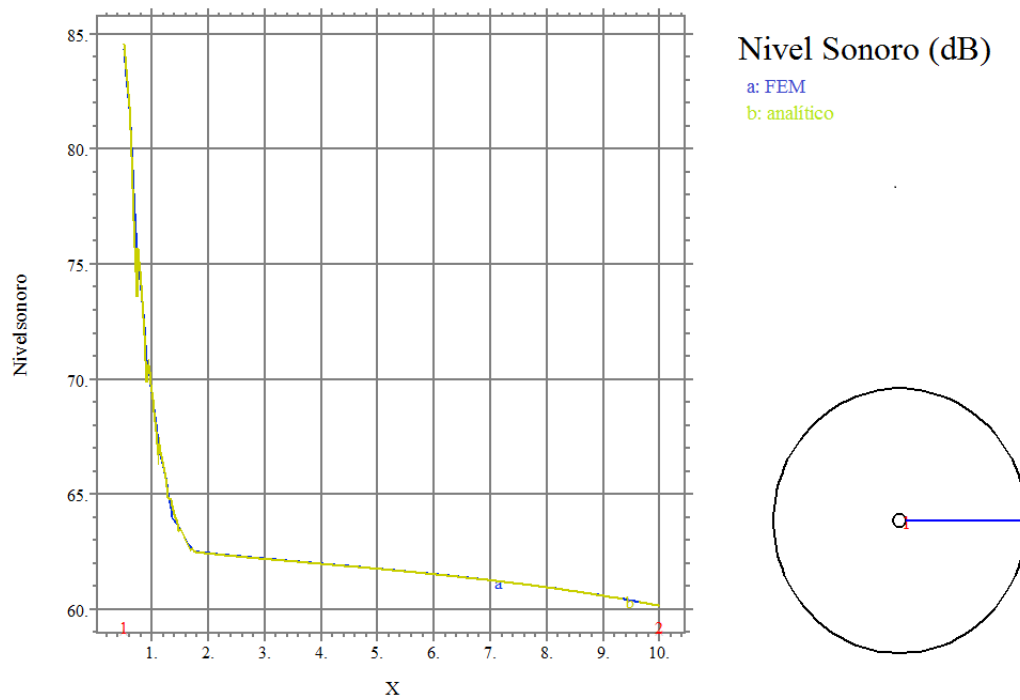


Figura 10. Nivel sonoro en las calles.

A continuación se considera una ciudad como aquella mostrada en la figura 11. Inicialmente la ciudad está dividida en 5 zonas (I a V) con diferentes características que se muestran en la Tabla 1.

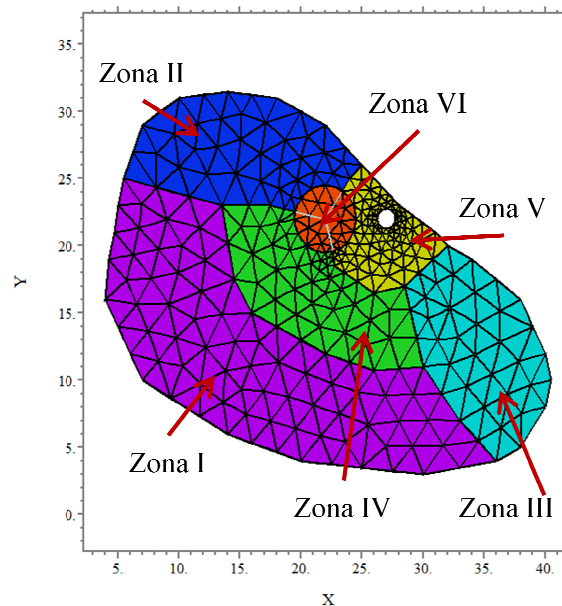


Figura 11. Zonas de la ciudad

Posteriormente se realiza una modificación en una zona de la ciudad indicada como zona VI en la figura 11. La modificación consiste en la reducción de la velocidad máxima

permitida a 30 km/h y de capacidad a 300 veh/h (que puede corresponder al ensanchamiento de veredas).

Tabla 1. Características de las zonas

Zonas	Q_1 (viajes/km ²)	C_1-C_2 (veh/h)	V_1-V_2 (km/h)	θ (grados)
I	100	600-600	40-40	0
II	100	500-500	40-40	0
III	80	500-500	40-40	0
IV	100	500-500	40-40	45
V	50	450-450	40-40	45
VI	---	300-300	30-30	---

Se pretende analizar el impacto de tales cambios sobre el patrón de flujo y el nivel sonoro en la zona aludida. Para ello, los problemas pertinentes son resueltos para la situación original y la modificada. En el cálculo del nivel sonoro se adoptaron los mismos valores que los correspondientes al ejemplo anterior, siendo la única modificación la correspondiente a la altura de los edificios en la zona V que se consideró de 15 m.

Los resultados se muestran en las figuras 12 a 15.

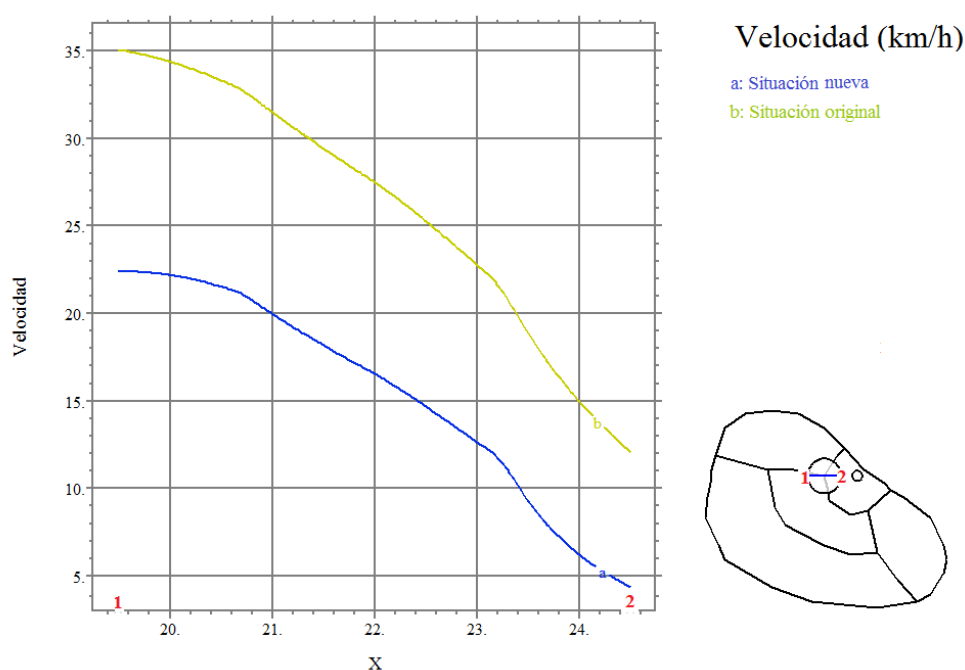


Figura 12. Velocidad de circulación en las calles de la zona IV.

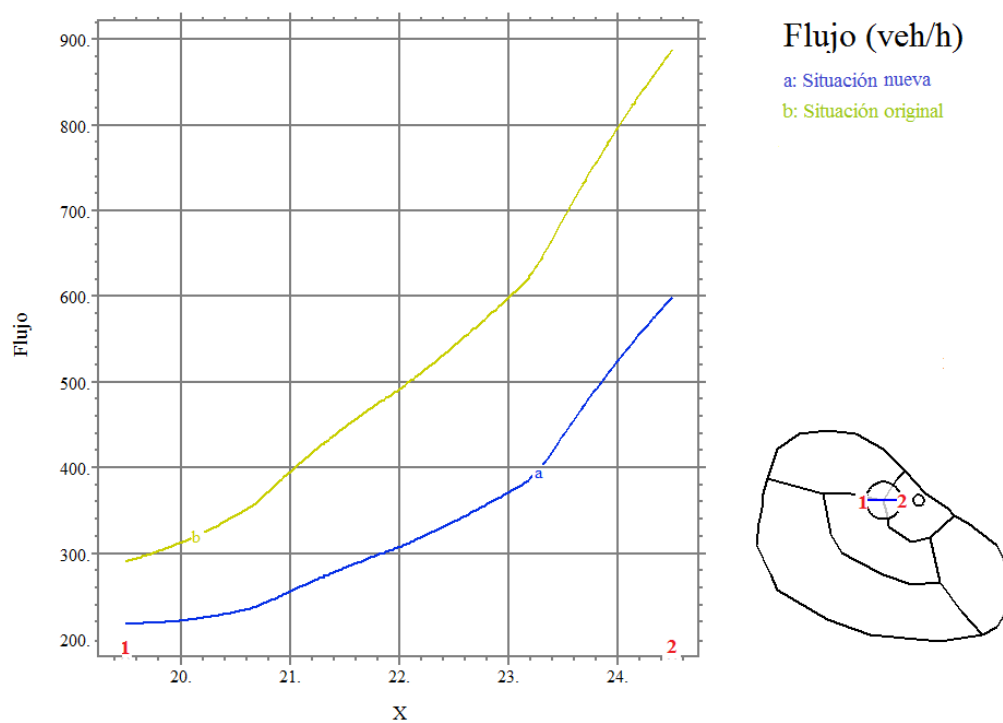


Figura 13. Flujo vehicular en las calles de la zona IV.

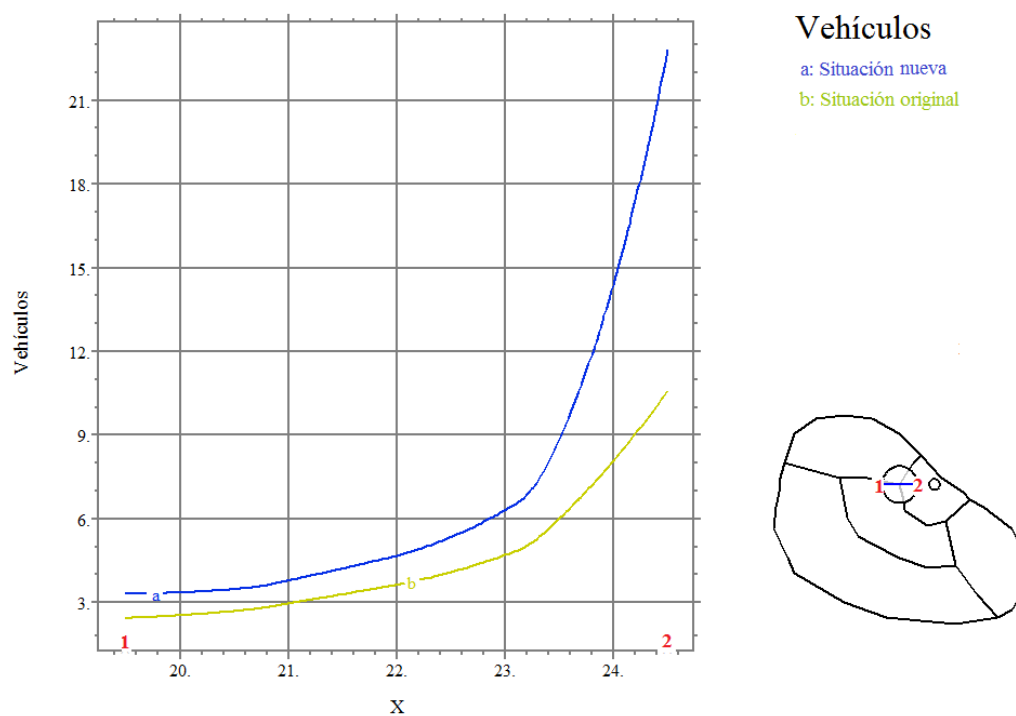


Figura 14. Cantidad de vehículos en las celdas de la zona IV.

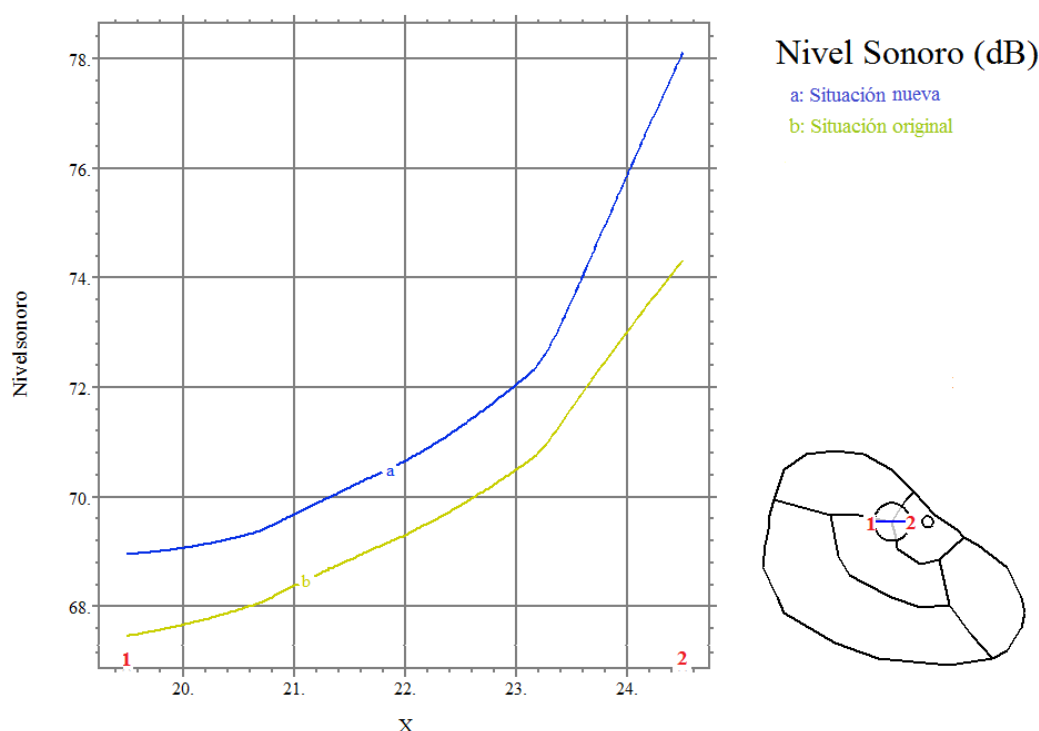


Figura 15. Nivel sonoro en las celdas de la zona IV.

Como puede apreciarse en las figuras, la zona se hace de tráfico más lento, disminuyendo la velocidad media en 10 km/h, el flujo vehicular en 200 veh/h, mientras que la cantidad de vehículos en cada celda urbana aumenta en 9 vehículos en la zona considerada. Esto indica una mayor congestión respecto a la situación inicial. Los niveles de presión sonora aumentan aproximadamente en 2 dB en la zona analizada. Debe sin embargo tenerse en cuenta que se ha supuesto una emisión de ruido constante de cada vehículo. Esto es, no se ha considerado su variación con respecto a la velocidad media. Este aspecto debe ser contemplado con mayor detalle ya que podría modificar las observaciones realizadas debido a la disminución que sufre generalmente la potencia sonora con la velocidad.

5 CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo integrado para el análisis del flujo vehicular urbano bajo condiciones de congestión, conjuntamente con el efecto acústico asociado.

El modelo de tráfico desarrollado hace posible la estimación de la elección de ruta por parte de los usuarios (problema de asignación en equilibrio) y consecuentemente el flujo vehicular y la velocidad media de circulación en cada arteria de la ciudad.

Respecto a teorías previamente propuestas, la actual se basa en un enfoque continuo del entramado urbano que conduce a ecuaciones diferenciales a derivadas parciales que pueden ser ventajosamente resueltas mediante el método de los elementos finitos.

Asimismo, el nuevo modelo de tráfico supone una mejora respecto a otros utilizados con anterioridad tales como el de Sasaki et al. (1990) ya que éste permite considerar en forma más detallada ciertos aspectos del patrón de tráfico tales como la anisotropía de la circulación.

Por otra parte, el modelo acústico empleado corresponde a la teoría desarrollada por Davies y Lyon (1973) que contempla las condiciones de propagación sonora en ambientes urbanos asumiendo condiciones reverberantes en cada celda urbana aunque permitiendo su

variación a lo largo de la ciudad. El modelo conduce a una ecuación diferencial a derivadas parciales para obtener la presión sonora del campo reverberante, a la cual debe sumarse la correspondiente al campo directo a fin de obtener la presión sonora del campo resultante.

Al igual que el modelo de tráfico es posible resolver la ecuación acústica utilizando el método de los elementos finitos. Esto es de importancia práctica ya que puede utilizarse el mismo programa computacional para tratar el modelo integrado. En particular aquí se ha utilizado el software FlexPDE (2015).

La teoría presentada puede ser extendida para la consideración de ciudades con autopistas, diversas clases de usuarios, etc.

Varios aspectos de los mencionados pueden consultarse en Dominguez (2013).

Más allá de la utilidad de tal enfoque computacional está claro que su aplicación en problemas urbanos reales requiere como paso previo la calibración adecuada con ayuda de diversas mediciones de flujo vehicular y campo sonoro.

Agradecimientos

El presente trabajo es parte del proyecto “Modelos Matemáticos en Ingeniería Ambiental: Diseño óptimo y control” (Secyt, Universidad Tecnológica Nacional) y del proyecto “Problemas de optimización en Ingeniería Civil” (Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur).

Referencias

- Beckmann, M. J.; Mc Guire, C. B.; Weinstein C. B. (1956). “Studies in economics of transportation Yale University Press”, New Haven, Connecticut, USA.
- Cortínez, Víctor H.; Dominguez, Patricia N. (2009) “Un Modelo Continuo de Asignación de Tráfico para el Estudio de Ruido Urbano”, Primeras Jornadas Regionales de Acústica Adaa 2009.
- Cortínez, Víctor H.; Dominguez, Patricia N. (2013) “Un Modelo de Difusión Anisótropa para el Estudio del Tráfico Urbano”. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 29(1), p. 1-11.
- Cortínez, Víctor H.; Stoklas, Cecilia I; Girón, Pablo G.; Azzurro, Adrian P.; Ercoli Liberto (2006) “Modelos de predicción de ruido de tránsito para la ciudad de Bahía Blanca, Argentina” Proc. V Congreso Iberoamericano de Acústica, Santiago de Chile, Chile.
- Davies, H.; Lyon, R. (1973). “Noise propagation in cellular urban and industrial spaces”. The Journal of the Acoustical Society of America 54, 1565-1570.
- Domínguez, Patricia N., (2013). “Un nuevo modelo continuo de asignación de tráfico para el diseño óptimo de redes de transporte urbano”, Tesis de doctorado en ingeniería, Universidad Nacional del Sur.
- Domínguez, Patricia N.; Vidal, Marta C. y Cortínez, Víctor H. (2009). “Diseño óptimo de redes de transporte urbano considerando aspectos medioambientales”. Mecánica Computacional Vol. XXVIII, 2599-2624.
- Dominguez, Patricia N.; Cortínez, Víctor H. (2011). “Un nuevo modelo continuo-discreto para el estudio del tráfico urbano con autopistas”. Mecánica Computacional Vol. XXX, 3543-3560.
- Dominguez, Patricia N.; Cortínez, Víctor H. (2012). “Un método continuo-discreto para el diseño óptimo de sistemas de transporte urbano”. Mecánica Computacional, Vol. XXXI, p.3335-3355.
- FlexPDE (2015). PDE Solutions, Inc. www.pdesolutions.com
- González, Alicia E. (2000). “Contaminación sonora en ambiente urbano: optimización del tiempo de muestreo en Montevideo y desarrollo de un modelo predictivo en un entorno atípico”. Tesis doctoral, U. Montevideo, Uruguay.
- Ho, H.; Wong, S.; Loo, B. (2003). “A continuous traffic equilibrium model with multiple user classes”. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies 5.

- Ho, H.; Wong, S.; Loo, B. (2006). "Combined distribution and assignment model for a continuum traffic equilibrium problem with multiple user classes". *Transportation Research, B* 40, 633-650.
- Kang, J. (2002). "Acoustics of Long Spaces: Theory and Design Guidance" Thomas Telford Publishing. January 1.
- Pasareanu, S.; Remillieux, M; Burdisso, R. (2012). "Energy-based method for near-real time modeling of sound field in complex urban environments". *J. Acoust. Soc. Am.* 132 (6).
- Picaut, J. (2002). "Numerical modeling of urban sound fields by a diffusion process", *Applied Acoustics* 63, 965–991.
- Sasaki, T.; Iida, Y.; Yang, H. (1990). "User equilibrium traffic assignment by continuum approximation of network flow". 11th International Symposium of Transportation and Traffic Theory, Yokohama, Japan, 233-252.
- Sequeira, Martín E.; Cortínez, Víctor H. (2012). "A simplified two dimensional acoustic diffusion model for predicting sound levels in enclosures". *Applied Acoustics*, 73 (8), 842-848.
- Sequeira, Martín E.; Cortínez, Víctor H. (2016). "Optimal acoustic design of multi-source industrial buildings by means of a simplified acoustic diffusion model". *Applied Acoustics*, 103 part A, 71-81.
- Shaw, E. A.; Olson, N. (1972). "Theory of Steady-State Urban Noise for an Ideal Homogeneous City". *The Journal of the Acoustical Society of America* 51, 1781-1793.
- Sheffi, Yosef. (1984). "Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods". Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA.
- U.S. Bureau of Public Roads (1964). Traffic assignment manual. U.S. Department of Commerce, Washington D.C.
- Wardrop, J. G. (1952). "Some theoretical aspects of road traffic research". *Institution of Civil Engineers II* (1), 325-378.
- Wong, S.; Sun, S. (2001). "A combined distribution and assignment model for continuous facility location problem". *Annals of Regional Science* 35, 267-281.