

ESTUDIO DE LA HUELLA ACÚSTICA DE VEHÍCULOS

PACS: 43.50.Rq

González J.; Tarrero A.; García L.; Machimbarrena M^a.; Martín M^a.

Dto de Física Aplicada
Universidad de Valladolid
Avda. Salamanca s/n
47014 Valladolid
Tel: 983 423 446
juliog@opt.uva.es

ABSTRACT

Studies related with traffic sources models, specified in the Harmonoise project, one of the parameters that is necessary take account is the vehicle trace. In this work, a study of the vehicle trace running in roads of Valladolid province (Spain) is made. In this study, some trace models are broken down and compared with experimental data, trying to validate the models deduced. Furthermore, a discussion of the different expressions of the models is made as well as the analysis of the results.

RESUMEN

En los trabajos relativos a modelos de fuentes de tráfico, especificados en el proyecto Harmonoise, uno de los parámetros que es necesario tener en cuenta es la huella del vehículo. En este trabajo hacemos un estudio de las huellas de vehículos rodando por carreteras de la provincia de Valladolid (Spain). En este estudio desglosamos algunos modelos de huellas y los comparamos con datos experimentales tratando de validar los modelos deducidos a la vez que hacemos discusión sobre las distintas expresiones de los modelos y analizamos los resultados obtenidos. Esta discusión se realiza para las distintas categorías de vehículos.

INTRODUCCIÓN

Cuando un vehículo circula por una calzada, el ruido que origina en un punto próximo, es variable en función de su posición respecto al punto. La curva que representa los niveles en función del tiempo, para el punto dado, es lo que se conoce como huella del vehículo. Se han realizado diferentes estudios de la huella de vehículos [1], [2], [3] destacando alguna de las características, pero no se ha llegado a su descripción completa, que sirva para todos los casos. La huella acústica de un vehículo depende de varios parámetros, unos son medibles pero otros dependen del conductor y son más complicados de evaluar. Uno de los parámetros principales que influyen a la hora de especificar la curva deriva de la emisión del vehículo según se especifica en la bibliografía [4], [5]. Los focos de emisión de ruidos más significativos

son la propulsión y la rodadura. En el apartado de propulsión se incluye, el motor, la emisión de gases, ruido de engranajes, y también el ruido aerodinámico y otras menos generalizadas. A pequeñas velocidades la fuente de ruidos aerodinámica es poco significativa. Al hablar de rodadura nos referimos a la interacción de las ruedas con el firme de la calzada. Por tanto la emisión de ruidos de un vehículo no es puntual y no está localizada su posición en un punto concreto.

En [2] se propone una expresión del modelo para cada una de las dos fuentes de ruido. Para el caso de fuente de propulsión la ecuación del modelo es:

$$L_{W,prop,z,m,i}(v_{eng},load)=A_{z,m,i}+B_{z,m,i}lg[(v_{eng}-v_{ref})/v_{ref}]+10lg(f_{z,m,i,prop}(\phi,\theta))+C_{z,m,i}(v_{eng},load)+C_{region,prop,z,m,i} \quad (1)$$

Y para el ruido de rodadura:

$$L_{W,roll,z,m,i}(v_{eng},load)=A_{z,m,i}+B_{z,m,i}lg[v_{eng}/v_{ref}]+10lg(f_{z,m,i,roll}(\phi,\theta))+\alpha_{roadll,m,i}(\phi,\theta)+\beta_{road,m,i}lg[v_{eng}/v_{ref}]+C_{weather,z,m,i}(v_{eng},load)+C_{region,road,z,m,i} \quad (2)$$

En estas expresiones los coeficientes hacen referencia a la casuística que se presenta y de esta forma A y B son parámetros a determinar para cada vehículo y los demás dan información del estado de la carretera, condiciones meteorológicas, formas de conducir propias de los conductores, etc. El objetivo principal es encontrar modelos de huellas de vehículos que describan, con cierto grado de aproximación, las huellas de los vehículos.

En el trabajo que presentamos planteamos diferentes modelos y aportamos datos experimentales para validarlos.

EXPRESIÓN DE LA HUELLA DE VEHÍCULOS

Consideremos un vehículo que circula con una velocidad v por una calzada recta, muy reflectante, de izquierda a derecha, según un observador situado en el punto (S) a una distancia d respecto de la calzada como se esquematiza en la figura 1. Suponiendo que el vehículo es una fuente puntual, la presión cuadrática en el punto (S), originada por la emisión de un vehículo, situado en el punto (A) a una distancia r_1 del punto (S) viene dada por la expresión:

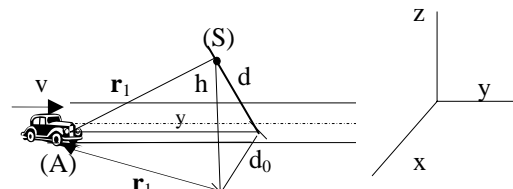


Fig.1- Esquema de circulación de un vehículo por las proximidades de un punto S.

$$P_s^2 = \rho_0 c I_s = \left(\frac{W \rho_0 c}{2\pi r_1^2} \right) = \left(\frac{W \rho_0 c}{2\pi (d_0^2 + h^2 + y^2)} \right) \quad (3)$$

Siendo I_s la intensidad del sonido en (S), W la potencia acústica emitida por el vehículo y $\rho_0 c$ la impedancia característica del aire.

En el instante que el vehículo pasa frente al observador es $y = 0$ y está a la mínima distancia $d = \sqrt{(d_0^2 + h^2)}$, y por tanto, la presión cuadrática P^2 será máxima y su expresión será $P_{max}^2 = \left(\frac{W \rho_0 c}{2\pi (d_0^2 + h^2)} \right)$. Ahora sustituyendo en (3) y despejando tendremos que $P_s^2 = \left(\frac{P_{max}^2 (d_0^2 + h^2)}{(d_0^2 + h^2 + y^2)} \right)$ y dividiendo por la presión cuadrática umbral, ambos miembros y desarrollando, obtenemos las expresiones:

$$\left(\frac{P_s^2}{P_0^2} \right) = \left(\frac{P_{max}^2}{P_0^2} \right) \left(\frac{d_0^2 + h^2}{d_0^2 + h^2 + y^2} \right) \Rightarrow 10 \log \left(\frac{P_s^2}{P_0^2} \right) = 10 \log \left(\frac{P_{max}^2}{P_0^2} \right) + 10 \log \left(\frac{d_0^2 + h^2}{d_0^2 + h^2 + y^2} \right) \Rightarrow$$

$$L_p = L_{p,max} + 10 \log \left(\frac{d_0^2 + h^2}{d_0^2 + h^2 + y^2} \right)$$

Si sustituimos en la ecuación $d^2 = (d_0^2 + h^2)$ nos queda la expresión

$$L_p = L_{p_{\max}} + 10 \log \left(\frac{d^2}{d^2 + y^2} \right) \quad (4)$$

Los valores experimentales estarán afectados por el ruido de fondo, pero en este estudio no lo tendremos en cuenta, aunque se ha medido y su valor es poco significativo frente a los valores de los niveles medidos, excepto cuando la fuente esté alejada del punto de medida.

MODELOS DE HUELLA.

Modelo con t_0

El valor de “y” lo podemos poner en función de la velocidad y del tiempo mediante la expresión $y = v(t-t_0)$ siendo t_0 el tiempo que tarda el vehículo en recorrer la distancia “y” a la velocidad constante v. De esta forma tendremos que

$$L_p = L_{p_{\max}} + 10 \log \left(\frac{d^2}{d^2 + v^2(t-t_0)^2} \right) = L_{p_{\max}} + 10 \log \left(\frac{1}{1 + \frac{v^2}{d^2}(t-t_0)^2} \right) \Rightarrow$$

$$L_p = L_{p_{\max}} - 10 \log \left(1 + \frac{v^2}{d^2}(t-t_0)^2 \right) \quad (5)$$

La gráfica correspondiente a esta ecuación, para un valor de $L_{p_{\max}}$, v, d, h y t_0 conocidos es lo que se conoce como huella del vehículo y nos indica cómo va variando el nivel de ruido, originado en un punto por un vehículo, en función del tiempo. En la figura 2 se representa la forma que tiene la huella de un vehículo circulando por un tramo recto de la calzada esquematizado en la figura 1 en la que se representa el nivel de ruido medido en un punto en unidades arbitrarias en función del tiempo, también en unidades arbitrarias.

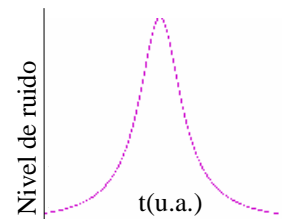


Fig.2.- Forma de la huella de un vehículo circulando por una calzada recta e infinita

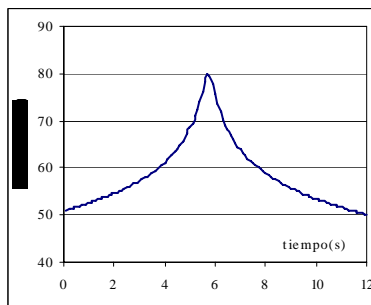


Fig.3.-Huella de un vehículo cuando: $L_{p_{\max}} = 80 \text{ dB(A)}$; $v=15 \text{ m/s}$; $t_0 = 5,7\text{s}$ y $d = 3,7 \text{ m}$.

aproximadamente $d=3,7 \text{ m}$ con una velocidad, $v = 15(\text{m/s})$, siendo la medida del sonómetro $L_{p_{\max}} = 80 \text{ dB(A)}$.

Otra forma de representar la huella

Partiendo de la ecuación (3) se puede obtener otra expresión de la curva huella del vehículo de la forma siguiente.

$$L_p = L_{p_{\max}} - 10 \log \left(1 + \frac{v^2}{d^2}(t-t_0)^2 \right) \Rightarrow L_{p_{\max}} - L_p = 10 \log \left(1 + \frac{v^2}{d^2}(t-t_0)^2 \right) \Rightarrow 10^{\frac{L_{p_{\max}} - L_p}{10}} = 1 + \frac{v^2}{d^2}(t-t_0)^2 \Rightarrow$$

$$f(L_{pmax} - L_p) = 1 + \left(\frac{v}{d}\right)^2 (t - t_0)^2 \quad (6)$$

A partir de esta ecuación tendremos que, para una velocidad v dada, el nivel de ruido que se mide, a una distancia d , desde la perpendicular a la calzada, cuando circula un solo vehículo por la calzada, está relacionado con el tiempo, por una ecuación de segundo grado dada por la expresión (6).

El primer miembro de esta ecuación está compuesto de valores experimentales y el segundo miembro es la ecuación del modelo. Entonces la ecuación de la curva que resulta de ajustar los valores experimentales se corresponde con la ecuación del modelo y de esta forma podemos valorar la bondad del modelo al comparar la curva experimental con la curva del modelo, conociendo v , d y t_0 .

La bondad del ajuste de la parábola a los datos experimentales la tenemos en cuenta a partir del coeficiente de correlación R^2 y los parámetros de esta parábola ajustada nos sirven para determinar los valores de los parámetros d , v y t_0 que aparecen en la curva del modelo. El parámetro principal a determinar, sería la velocidad dado que no es fácil conocer la velocidad de los vehículos, desde el exterior, salvo si se dispone de unos medios específicos adecuados, y por tanto adquiere especial relevancia poder conocer la velocidad de forma sencilla a la vez que se conocen los niveles de ruido.

En la figura 4 se representan los valores obtenidos en uno de los casos, haciendo medidas de L_{pmax} y de los niveles L_p , para un vehículo semipesado. Superpuesta a la curva de los puntos experimentales de color azul, aparece la curva ajustada en color negro, así como la ecuación de la curva ajustada, y el coeficiente de correlación R^2 .

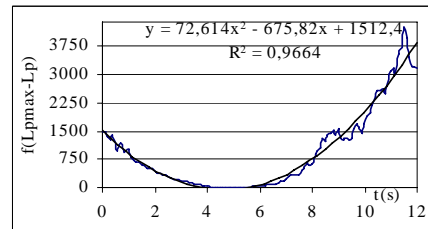


Fig.4 - Curva de variación del nivel de ruido en función del tiempo para un vehículo semipesado.

La curva obtenida, a partir de la ecuación del modelo, debe aproximarse a la experimental. Por tanto los parámetros de ambas curvas han de ser aproximadamente iguales. La igualdad de los parámetros correspondientes de ambas curvas nos permite comparar los valores de los parámetros d , v , y t_0 , introducidos en el modelo, con los que se obtienen de forma experimental.

En la gráfica de la figura 5 aparecen, casi totalmente superpuestas las tres curvas: azul que es la de los valores experimentales, la negra que es la curva ajustada, cuya ecuación aparece también en la figura y de color rosa obtenida mediante el modelo para los valores de los parámetros que se adjuntan en la tabla I, donde se acompañan algunas de las características asociadas a la categoría del vehículo y al estado de la calzada.

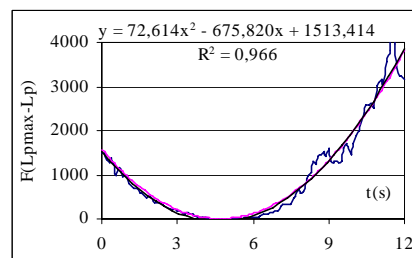


Fig.5 - Curva de variación del nivel de ruido en función del tiempo para un vehículo semipesado con $t_0 = 4,7$ s

Estado suelo	Vehículo	L_{pmax} dB(A)	d (m)	v (m.s ⁻¹)	t_0 (s)
Asf. Moj	Semipesado	86,5	3,5	30	4,7

Tabla I. – Valores de los parámetros del modelo con $t_0 = 4,7$ s .

Modelo tomando el flujo de vehículos Q

Si tenemos en cuenta el flujo de vehículos, que suponemos es constante: $Q = N^{\circ} \text{ vehí/t}$, con "t" en segundos, y denominamos por k el número de vehículos que caben en la calzada en el espacio de longitud dada por $v \cdot t_0$. La huella del vehículo que tarda en pasar t_0 segundos por el punto de la calzada situado frente al de medida, se corresponde con el valor de $k = Q \cdot t_0$. De esta forma la ecuación de la huella de un vehículo será:

$$L_p = L_{pmax} + 10 \log \left(\frac{1}{1 + \frac{v^2}{d^2} (t - \frac{k}{Q})^2} \right)$$

Así, por ejemplo, la huella del vehículo que pasará dentro de 1 segundo frente al observador será el caso de $k=Q$ y tendrá por ecuación

$$L_p = L_{pmax} + 10 \log \left(\frac{1}{1 + \frac{v^2}{d^2} (t-1)^2} \right)$$

Y la huella del vehículo que tardará 2 segundos en pasar por delante del observador será el caso de $k=2Q$. O sea, el valor de k, para la huella de un vehículo determinado, se corresponde con el número de vehículos que caben entre el punto donde se encuentra el vehículo, cuando iniciamos la medida, y el punto frente al observador. La huella del vehículo que tardará Q segundos en pasar por delante del observador será el caso de $k=Q^2$

Si el flujo de vehículos Q fuera de 1 vehículo por segundo, el valor de k coincidiría con el valor de t_0 .

En la figura 6 representamos la huella de un vehículo, expresada de esta forma, tomando el valor de $L_{pmax} = 80 \text{ dB(A)}$; $d=3,7\text{m}$; $k=17,2 \text{ veh.}$; $v=15 \text{ m/s}$ y suponiendo $Q=3 \text{ veh.s}^{-1}$.

Haciendo el mismo desarrollo que en el apartado anterior, llegamos a la expresión: $f(L_{pmax} - L_p) = 1 + \left(\frac{v}{d}\right)^2 (t - \frac{k}{Q})^2$

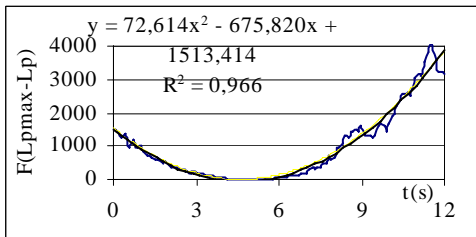


Fig. 7.- Curva de variación del nivel de ruido en función del tiempo para un vehículo semipesado con $k=4,7 \text{ veh}$ y $Q=2,5 \text{ veh.s}^{-1}$.

En la figura 7 representamos, junto con las mismas curvas obtenidas a partir de los datos experimentales (azul y negra) del apartado

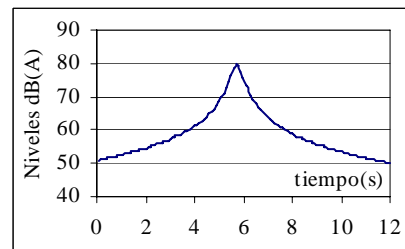


Fig 6.- Huella de un vehículo con $L_{pmax} = 80 \text{ dB(A)}$; $v=15 \text{ m/s}$; $d=3,7 \text{ m}$; $k=17,2$ suponiendo $Q=3 \text{ veh.s}^{-1}$

anterior, la curva amarilla obtenida para esta expresión del modelo En la tabla II exponemos los valores de los parámetros del modelo.

Estado suelo	Vehículo	L_{pmax} dB(A)	d (m)	v (m.s^{-1})	k (n° veh)	Q (veh.s^{-1})
Asf. Moj	Semipesado	86,5	3,5	30	11,4	2,5

Tabla II. – Valores de los parámetros del modelo con $k=11,4 \text{ veh}$ y $Q=2,5 \text{ veh.s}^{-1}$.

Modelo de huella utilizando la distancia entre vehículos Modelo con l_1

Otra forma de expresar el modelo es partiendo de la ecuación (4) poniendo "y" en función de la separación l_1 entre dos vehículos consecutivos, según se representa en la figura 8. Tomando una referencia standard con origen en el punto del suelo donde está el observador, y el eje "y" paralelo a la calzada, y el eje "z" vertical, la coordenada "y" de la posición del vehículo (1) situado en (A) es de la forma $y = (kl_1 - vt)$ siendo k el parámetro introducido anteriormente, que se corresponde con el número de vehículos que caben en el tramo de la calzada comprendido entre (A) y el punto frente al observador. El valor de l_1 es diferente para las diferentes categorías de vehículos y el valor de k es negativo cuando indica el número de vehículos que se encuentran a la derecha del observador. La ecuación para la huella de un vehículo la obtenemos sustituyendo en (4) y nos queda

$$L_p = L_{pmax} + 10 \log \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{d^2} (kl_1 - vt)^2} \right) \Rightarrow L_{pmax} - L_p = 10 \log \left(1 + \frac{1}{d^2} (kl_1 - vt)^2 \right)$$

Desarrollando la ecuación llegamos a que:

$$\left(10^{\frac{L_{pmax} - L_p}{10}} \right) = 1 + \left(\frac{kl_1 - vt}{d} \right)^2 \quad (9)$$

Al igual que hicimos en el apartado anterior, en la figura 9 se representan las gráficas superpuestas de la huella del mismo vehículo, pero en este caso la curva del modelo es de color magenta y viene expresada por la ecuación (7). Apenas si se detecta su presencia por estar solapada por la curva negra deducida del ajusta. En la tabla III se especifican los valores de los parámetros del modelo.

Estado suelo	Vehículo	L_{pmax} dB(A)	d (m)	v ($m \cdot s^{-1}$)	k (nº veh)	l_1 (m)
Asf. Mojado	Semipesado	86,5	3,5	30	11,4	12,3

Tabla III. – Valores de los parámetros del modelo con $k=11,4$; $l_1=12,3$ m.

Modelo considerando que la distancia entre vehículos varía con la velocidad

En España la reglamentación del tráfico establece que la distancia entre los vehículos, circulando por la calzada, debe ser diferente dependiendo de la velocidad de circulación. Una forma de expresar esta condición es suponer que la distancia es de la forma $(l_0 + sv)$ siendo l_0 la longitud de un vehículo y s un coeficiente de proporcionalidad entre la distancia que se debe mantener y la velocidad de circulación.

Teniendo en cuenta esta expresión, la ecuación (9) se escribirá de la forma:

$$\left(10^{\frac{L_{pmax} - L_p}{10}} \right) = 1 + \left[\frac{k(l_0 + sv) - vt}{d} \right]^2 \quad (10)$$

Tomando como referencia la ecuación de la curva ajustada, obtenemos a partir de sus coeficientes y término independiente, con $k = 11,4$, que los valores de los parámetros, v, l_0 y s son los que se especifican en la tabla IV y la gráfica de la curva aparece superpuesta con la ajustada y la experimental, de igual forma que en los supuestos anteriores tal y como se observa en la figura 10.

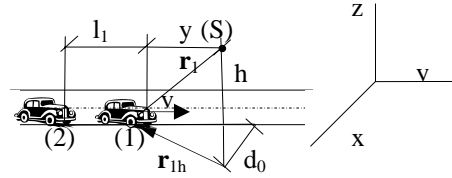


Fig.8. - Esquema de circulación de dos vehículos por las proximidades de un punto (S).

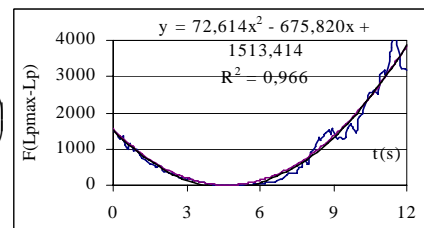


Fig.9. - Curva de variación del nivel de ruido en función del tiempo para un vehículo semipesado con $l_1=12,3$ m

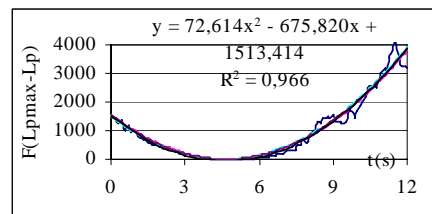


Fig.10. - Curva de variación del nivel de ruido en función del tiempo para un vehículo semipesado con $l_0=4,2$ m; $s=0,27$

Estado suelo	Vehículo	L_{pmax} dB(A)	d (m)	v ($m.s^{-1}$)	k (nº veh)	l_0 (m)	s
Asf. Mojado	Semipesado	86,5	3,5	30	11,4	4,2	0,27

Tabla IV. – Valores de los parámetros del modelo con $k=11,4$ veh ; $l_0=4,2$ m ; $s = 0,27$

Representación conjunta

Reagrupando todas las gráficas obtenemos la figura 10 donde aparecen todas las representaciones de los modelos junto con la curva de datos experimentales y la curva ajustada.

En la tabla V se exponen el resumen de los valores de todos los parámetros de los distintos modelos de la huella de un vehículo.

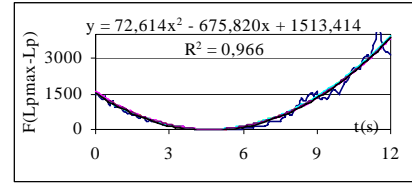


Fig. 11. - Curvas de variación del nivel de ruido en función del tiempo para un vehículo semipesado para los cuatro modelos.

Estado	Vehículo	L_{pmax} dB(A)	d	v(cal)	t_0	Q	k_1	l_1	l_0	s
Asf . Mojado	Semipesado	86,5	3,5	30	4,7	2,5	11,4	12,3	4,2	0,27

Tabla V. – Valores de los parámetros del modelo con $L_{pmax} = 86,5$ dB(A); $d=3,5$ m; $v=30$ m.s-1; $k=11,4$ veh ; $l_1=12,3$ m ; $l_0=4,2$ m ; $s = 0,27$

CONCLUSIONES

De forma resumida la conclusión que consideramos más significativa es que estos modelos describen con bastante precisión la huella de un vehículo aun sin tener en cuenta el ruido de fondo, ni las absorciones en el suelo ni las posibles interferencias de rayo directo y reflejado. La selección del modelo en cada caso dependerá del estudio que se pretenda realizar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martín Bravo M^a A.; Tarrero Fernández A.I.; Arias Puga, J.E.; González Suárez J.; Machimbarrena Gutiérrez M. *Determination of the Acoustic Trace of Vehicles*. Revista de Acústica; ISBN: 84-87985-12-2; vol.38, num.3-4, pp 1-6. Año 2007.
- [2] K. Heutschi. *On Single Events measurements of Heavy Road Vehicles in Freely Flowing Traffic*. Acta Acústica; Vol. 94 (2008); PP 709-714.
- [3] A. Can ; L. Leclercq. *Selecting noise Source and Traffic Representations that Capture Road Traffic Noise Dynamics Near Traffic Signals*. Acta Acústica; Vol. 95 (2009); PP 259-269.
- [4] *Harmonoise, Work Package 1.1 ;Documento: HAR11TR-041210-SP10; 2004*
- [5] (IMAGINE) *The Noise Emission Model For European Road Traffic; 2007*