

# ANÁLISIS DISCRIMINANTE DE ALGUNAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA DEBIDA AL TRÁFICO URBANO EN UNA GRAN CIUDAD\*

Javier Morales Pérez\*\*  
Jaime Fernández Gómez\*\*\*

Recibido: 05/03/2012

Aceptado: 05/10/2012

## RESUMEN

El ruido producido por el tráfico es función de un gran número de variables, unas propias de las características de la calzada y del entorno por el que discurre, y otras propias de los vehículos. De todas las variables que pueden influir, solo unas pocas están estudiadas en profundidad para ver su relación real con la contaminación acústica. El nivel de presión sonora,  $Leq$ , es el índice utilizado para evaluar la contaminación acústica, y la unidad de medida es el decibelio.

Esta investigación consiste en la medición de todas las variables presentes en una gran ciudad que pudieran tener alguna influencia en la contaminación acústica, así como el nivel de ruido en la ciudad de Madrid. Todo ello mediante un trabajo de campo en el que se han medido 519 puntos de forma aleatoria, en los que se iban registrando todos estos datos.

**Palabras clave:**  $Leq$ , ruido, vehículos, variables, modelo

---

\* Producto de investigación financiada por el Grupo Santander.

\*\* Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid. Licenciado en Ciencias Biológicas. Coordinador de las carreras de Ciencias Ambientales. Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio. Av. de la Universidad 1, Villanueva de la Cañada, 28961 Madrid. España. Tlf. 91 810 91 33 email: jmoraper@uax.es

\*\*\* Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales. y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Profesor Aranguren s.n., 28040 Madrid. Tf. 91 675 31 00 email: jfernandez@intemac.es

# DISCRIMINANT ANALYSIS OF SOME VARIABLES THAT IMPACT ACOUSTIC CONTAMINATION CAUSED BY URBAN TRAFFIC IN A BIG CITY

## **Abstract**

Noise caused by traffic is the result of several variables; ones inherent to features of roads and the environment it crosses, and some others inherent to vehicles. From all variables which could cause this kind of noise, only few of them have been studied in depth intended to understand its real relationship to acoustic contamination. The level of sound pressure (Leq.) is the index used for evaluating acoustic contamination and the unit of measure is the decibel.

This research involves measurement of all variables present in a big city which could have an impact on acoustic contamination, as well as the level of noise in Madrid City. All this conducted through a field work where 519 places were randomly measured and all this data were recorded.

**Key words:** Leq; noise; vehicles; variables; model.

## INTRODUCCIÓN

El ruido es un contaminante común que se podría definir, según los especialistas, como “aquella emisión de energía originada por un conjunto de fenómenos vibratorios aéreos que, percibidos por el sistema auditivo, puede originar molestias o lesiones de oído”. En cualquier caso todas las definiciones se agrupan en torno a sonido desagradable, sonido no deseado, sonido perjudicial, etc.

El indicador más usado y el que utilizan las legislaciones sobre ruido en las ciudades es el Nivel Sonoro Continuo Equivalente (LAeq,T) expresado en decibelios A. Es equivalente, en términos de contenido energético, al ruido real variable con el tiempo que existe en el punto de medida durante el período de observación; es decir, representa el nivel sonoro que habría sido producido por un ruido constante en el mismo intervalo de tiempo T. Hay que expresar el intervalo de tiempo que se toma como medida. La expresión matemática de este nivel es:

$$L_{Aeq,T} = 10 \text{Log} \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_A^2(t)}{P_o^2} dt \right) [dB(A)] \quad (1)$$

Siendo PA(t) la presión sonora instantánea ponderada A, Po la presión acústica de referencia y el tiempo de duración de la medida en segundos.

En la práctica LAeq,T se calcula sumando n niveles discretos de presión sonora Li, en dB(A), emitidos durante los intervalos de tiempo ti, en segundos, respectivamente:

$$L_{Aeq,T} = 10 \text{Log} 1/T \sum 10^{Li/10} t_i \quad (2)$$

El ruido producido por el tráfico es la mayor fuente de contaminación acústica en las ciudades. Hay un gran número de variables que influyen en este tipo de contaminación [1], algunas de ellas relacionadas directamente con los vehículos, y otras del entorno por el que circulan [2]. Algunas evidentes y otras no tan evidentes, las variables en las que nos vamos a centrar son las siguientes:

- Variables cualitativas:
  - Geometría de la vía:** sentidos, mediana y vehículos estacionados
  - Edificaciones:** material de fachada, Forma de la fachada y existencia de arbolado
  - Tipo de intersecciones:** semáforo y glorieta
- Variables cuantitativas:
  - Geometría de la vía:** n.º de carriles, anchura de la calle, valor de pendiente, velocidad
  - Edificaciones:** altura de edificios y porcentaje de superficie acristalada

## 1 MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación vamos a presentar parte de los resultados de la tesis doctoral “**Estudio de la influencia de determinadas variables en el ruido urbano producido por el tráfico de vehículos**” desarrollada en el Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, en la cual se ha medido la Leq en 519 puntos de calles de Madrid, a diferentes horas y en diferentes días.

El trabajo se desarrolló en dos fases:

PRIMERA FASE. Planificación y estimación de niveles de ruido en determinadas calles de Madrid con las intensidades promedio de tráfico rodado (IMD) existente en los puntos de medición (519). Elaboración de reportaje fotográfico y puesta en común de los datos obtenidos a partir de la medición.

Estos puntos de medición se han escogido al azar por todas las calles de Madrid intentando que haya una heterogeneidad de situaciones en cuanto a las variables que se quieren estudiar. Se han estudiado unas 47 calles, entre las que se encuentran calles muy importantes como el Paseo de la Castellana o la calle Serrano, hasta calles muy pequeñas casi sin tránsito de vehículos.

Las mediciones se han realizado de lunes a sábado y en horario tanto diurno como nocturno, aunque predominan los primeros. Las calles de

gran longitud como el Paseo de la Castellana se dividieron en varios tramos para su estudio por lo que se realizaron en diferentes días y, a veces, también en diferente horario.

En cada uno de los 519 puntos objeto de estudio se siguió un proceso para llevar a cabo la toma de datos:

- En primer lugar, se colocaba el sonómetro orientándolo siempre hacia el principal foco de ruido (vía por la que transitan los vehículos) y vigilando que no estuviera cerca de un lugar por el que transitasen peatones a escasa distancia para que las mediciones no se vieran alteradas por circunstancias ocasionales. Una vez colocado, se cronometraron 15 minutos para que el sonómetro pudiera realizar las oportunas mediciones de  $Leq$  y  $L_{máx}$ .
- Además, con el fin de identificar los diferentes puntos de medición, se tomaron 3 fotografías por cada uno de ellos: una a la izquierda, otra al centro y la última a la derecha de la dirección hacia la cual estaba orientado el sonómetro (Véase figura 1).

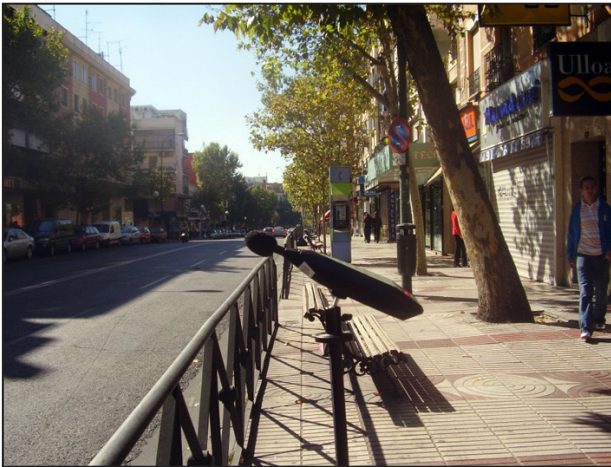


Figura 1. Sonómetro midiendo

Fuente: elaboración propia

- A continuación se realizaron las oportunas mediciones de anchura de vía y anchura de acera, así como se anotó el número de plantas

de los edificios del entorno y altura de cada uno de ellos, con el fin de poder calcular la altura media.

- Después de realizar estos trabajos se contabilizaba la intensidad del tráfico que circulaba por la zona de la medición, ya que, como es sabido, una mayor afluencia de vehículos provoca un aumento en los niveles de ruido. Con el objetivo de contar con la mayor cantidad de información posible y conocer todos los parámetros que pudieron intervenir en los resultados mostrados por el sonómetro, se separó el tráfico en motocicletas, turismos y furgonetas, camiones y autobuses, ya que es importante conocer la densidad de vehículos pesados debido a que estos generan un mayor ruido de fondo. Además, también se calculó la velocidad media de todos estos vehículos.

La medida de los diferentes puntos se ha realizado con un sonómetro integrador modelo RION NL-20 (figura 1). Todo esto se hacía mediante unas fichas de campo en las que se recogían todos los datos. En la figura 2 se muestra un ejemplo.

SEGUNDA FASE. Análisis de los datos obtenidos para tratar de ver qué variables afectan el ruido y en qué medida. Este estudio se ha realizado mediante el programa estadístico SPSS.

## 2 RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis discriminante consiste en la obtención de unas funciones lineales a partir de las variables independientes, denominadas funciones discriminantes, que permitan clasificar las calles en cada uno de los grupos establecidos por la variable dependiente [3].

La expresión de una función discriminante,  $D_s$ , será:

$$D_s = B_{s1}X_1 + \dots + B_{sp}X_p + B_{s0} \quad (3)$$



**Tabla 1.** Tamaño de los grupos

Leq

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulativo
Grupo	1,00	213	41,0	41,0	41,0
	2,00	306	59,0	59,0	100,0
	Total	519	100,0	100,0	

Fuente: elaboración propia

El objetivo de este análisis es establecer un modelo que pueda predecir a partir del diseño de una calle, considerando las variables estudiadas, a cuál de los grupos pertenecerá.

Las variables estudiadas consideradas porque tienen que ver en el diseño son las siguientes:

Variables que dependen del sistema urbano. Se pueden dividir en los siguientes grupos:

- Geometría de la vía. Incluyendo el sentido de circulación (único o doble), la existencia de mediana, el número de carriles de la vía, la anchura de la vía, pendiente y velocidad de circulación.
- Entorno urbano. Contemplando la existencia de arbolado y la existencia de vehículos estacionados (a uno o dos lados)

**Tabla 2.** Resultados del Chi cuadrado

Grupo de análisis	Variables	Discretización de las variables	Chi cuadrado de Pearson
Sistema Urbano	Geometría de la vía	Sentido de circulación	,000
		Existencia de mediana	,518
		Nº de carriles	,000
Anchura de la vía		,000	
Pendiente		,004	
Velocidad de circulación		,038	
Entorno Urbano	Arbolado	Vehículos estacionados	,392
			,000
Tipo de intersección	Sin intersección		
	Semáforo		,000
	Glorieta		,042
Edificación	Material de la fachada	Ladrillo	,710
		Mortero	,332
		Ladrillo-mortero-hormigón	,324
		Piedra	,034
		Mármol-cerámica	,226
		Cristal	,004
		Ladrillo-piedra	,684
	Forma de la fachada	Poligonal-irregular	,042
		Lisa-recta-normal	,607
		Existencia de balcones	,483
Redondeada		,219	
Altura de los edificios	N.º de plantas		,000
Superficie de fachada acristalada	≤ 50%		
	> 50%.		,038

Fuente: elaboración propia

- Tipo de intersección cercano al punto de medición. Contemplando la existencia de glorietas y semáforos.

VARIABLES QUE DEPENDEN DE LA EDIFICACIÓN. SON LAS SIGUIENTES:

- Material de la fachada, que contempla los grupos de ladrillo, mortero, combinación de ladrillo-mortero-hormigón, piedra, mármol-cerámica, cristal y ladrillo-piedra.
- Forma de la fachada. Utilizándose la siguiente clasificación: poligonal-irregular, lisa-rectangular, existencia de balcones y redondeadas.
- Altura de edificios. Considerándose aquí el número de plantas de los edificios del entorno de medición.
- El porcentaje de superficie acristalada. Estableciéndose la medida de esta variable en intervalos de porcentaje de superficie acristalada en  $\leq 50\%$  y  $> 50\%$ .

Lo primero que se hace, para ver qué variables tienen influencia sobre el ruido ( $L_{eq}$ ) y cuáles no, es un test Chi Cuadrado, cuya hipótesis nula es “existe independencia entre las variables”, de modo que no existiría ninguna característica asociada a un mayor nivel de ruido (Tabla 2).

A continuación se exponen los coeficientes de diagnóstico del modelo de funciones discriminantes:

En la tabla 3 se puede ver que se obtiene un autovalor de 0,432, lo que significa que un 43,2% de la variabilidad está explicado por esta función. No es todo lo alto que sería deseable, pero es compensado con la eficiencia del modelo que se verá posteriormente.

En la matriz de estructura (tabla 4) podemos observar la contribución de cada variable a la función discriminante. Vemos que la variable que más contribuye, con bastante diferencia, es el número de carriles lo que se debe a su asociación directa con la intensidad de tráfico. Después nos encontramos con una aportación similar, anchura total de

la calle, dos sentidos de circulación y la existencia de semáforos. Las dos primeras tienen también bastante que ver con la intensidad del tráfico, no tan claramente como el número de carriles, pero sí se ve en la muestra considerada que, en general, cuanto más ancha es una calle, más carriles tienen y, por tanto, más tráfico. De la misma forma, calles con dos sentidos de circulación están asociadas a mayores intensidades que aquellas de uno solo.

Tabla 3. Autovalores obtenidos

Autovalores				
Función	Autovalor	% de Varianza	Acumulativo %	Correlación Canónica
1	,432*	100,0	100,0	,549

\* 76,2% de los grupos originales clasificados correctamente  
Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Matriz de estructura

Matriz de Estructura	
	Función
	1
N.º de carriles	,810
Anchura_total	,354
Semáforo	,333
Sentidos	,309
Vehículos estacionados a ambos lados:	-,306
Velocidad Media	,223
% superficie acristalada	,222
Altura de edificios (Plantas)	,189
Material de la fachada: cristal	,177
forma 1	-,135
Material de la fachada: piedra	,120
Valor de pendiente	,107
Vehículos estacionados a un lado:	-,081
Glorieta	,030

Fuente: elaboración propia

En cuanto al semáforo su asociación a niveles más elevados de ruido es debido al arranque de los vehículos.

Después nos encontramos velocidad media y porcentaje de superficie acristalada con contribu-

ciones prácticamente iguales: según aumentan peores para el ruido.

La altura de los edificios y las fachadas de piedra también contribuyen negativamente a la contaminación acústica; según aumentan estas dos variables, peor es para la contaminación acústica.

Por último, tenemos la existencia de pendiente, relacionada con la circulación en marchas más cortas, y por tanto más ruido, y las glorietas con un valor muy bajo, probablemente debido a que por un lado son zonas de acumulación de tráfico, pero a la vez son zonas más abiertas que cualquier otro punto de la calle.

Los que contribuyen de forma negativa a la función discriminante son los vehículos estacionados a uno o los dos lados de la calle, con efecto de apantallamiento, y las formas poligonales o irregulares de los edificios, que parece que modifican, en parte, la reflexión del ruido.

Los coeficientes obtenidos en la tabla 5 para cada grupo nos permiten realizar la función lineal del tipo:  $D_s = B_{s1}X_1 + \dots + B_{sp}X_p + B_{s0}$  (3)

**Tabla 5.** Funciones discriminantes de Fisher

Coeficientes de la Función de clasificación		
	Leq	
	1,00	2,00
Velocidad Media	,188	,200
Sentidos	11,808	11,778
Valor de pendiente	,672	,853
Vehículos estacionados a ambos lados:	4,325	3,409
Vehículos estacionados a un lado:	4,053	3,919
Altura de edificios (Plantas)	,100	,085
% superficie acristalada	,083	,102
Semáforo	1,442	2,333
Glorieta	2,933	2,944
Material: piedra	-4,017	-4,026
Forma poligonal/irregular	1,986	1,422
Anchura_total	,013	-,006
N.º de carriles	-,490	,070
(Constant)	-17,829	-20,621

Fuente: elaboración propia

Siendo  $B_s$  los coeficientes de la tabla anterior y  $X$  los valores de las variables consideradas en los casos que queremos clasificar.

En nuestro caso particular, las funciones discriminantes serían las siguientes:

$$\text{Leq 1: } D1 = 0,188 X_1 + 11,808 X_2 + 0,672 X_3 + 4,325 X_4 + 4,053 X_5 + 0,100 X_6 + 0,083 X_7 + 1,442 X_8 + 2,933 X_9 - 4,017 X_{10} + 1,986 X_{11} + 0,013 X_{12} - 0,490 X_{13} - 17,829 \quad (4)$$

$$\text{Leq 2: } D2 = 0,200 X_1 + 11,778 X_2 + 0,853 X_3 + 3,409 X_4 + 3,919 X_5 + 0,085 X_6 + 0,102 X_7 + 2,333 X_8 + 2,944 X_9 - 4,026 X_{10} + 1,422 X_{11} - 0,006 X_{12} + 0,070 X_{13} - 20,62 \quad (5)$$

Donde:

$X_1$  Velocidad Media,  $X_2$  Sentidos,  $X_3$  Valor de pendiente,  $X_4$  Vehículos estacionados a ambos lados,  $X_5$  Vehículos estacionados a un lado,  $X_6$  Altura de edificios (Plantas),  $X_7$  % superficie acristalada,  $X_8$  Semáforo,  $X_9$  Glorieta,  $X_{10}$  Material de la fachada: piedra,  $X_{11}$  Forma poligonal/irregular,  $X_{12}$  Anchura\_total,  $X_{13}$  N.º de carriles

La tabla 6 nos permite comprobar la capacidad predictiva de la función discriminante del modelo creado, que en este caso es del 76,2%.

**Tabla 6.** Resultados de la clasificación por grupos

Resultados de la Clasificación					
		Leq	Predicción de componentes por grupo		Total
			1,00	2,00	
			Original	Número	
2,00	72	205			277
%	1,00	79,2		20,8	100,0
	2,00	26,0		74,0	100,0

Fuente: elaboración propia

Con todo esto, si tenemos un punto de una vía, en el que conocemos el valor de las variables de la función discriminante dada anteriormente, y



queremos saber a cuál de los dos grupos definidos pertenece, grupo 1: menor o igual a 70 dBA o grupo 2: más de 70 dBA, solo tenemos que sustituir los valores en las dos funciones y ver el resultado final. Aquella con una mayor puntuación discriminante nos indicará a qué grupo pertenece el punto que estamos estudiando.

### 3 DISCUSIÓN

Vamos a comprobar su efectividad con alguno de los puntos de medida utilizados para este estudio. Para ello utilizaremos cuatro puntos de dos calles de Madrid: dos de la calle Arturo Soria, y otros dos de la calle Embajadores.

Ejemplo 1: tabla 7.

Arturo Soria Punto 15:  $Leq = 67.2$

Punto 16:  $Leq = 72.4$

El punto 15 pertenecería a el grupo 1, ya que la puntuación de este: 21,806 es mayor que la del grupo 2: 21,421.

La clasificación es, por tanto, correcta.

El punto 16 pertenecería al grupo 2, ya que tenemos una puntuación de 23,143 frente a la del grupo 1 que es 21,145.

La clasificación aquí es también correcta.

Ejemplo 2: tabla 8.

Calle Embajadores Punto 10:  $Leq = 70.9$

Punto 11:  $Leq = 65$

El punto 10 pertenecería a el grupo 2, ya que la puntuación de este: 17,789 es mayor que la del grupo 1: 15,336.

La clasificación es correcta.

**Tabla 7.** Resultados de la clasificación calle Arturo Soria

Variables	Punto 15	Punto 16	Coef. Grupo Leq1	Coef. Grupo Leq 2	Total Leq 1 Punto 15	Total Leq 2 Punto 15	Total Leq 1 Punto 16	Total Leq 2 Punto 16
Velocidad Media	45	50	,188	,200	8,46	9,00	9,40	10,00
Sentidos	2	2	11,808	11,778	23,62	23,56	23,62	23,56
Valor de pendiente	1	1	,672	,853	0,67	0,85	0,67	0,85
Vehículos estacionados a ambos lados:	1	0	4,325	3,409	4,33	3,41	0,00	0,00
Vehículos estacionados a un lado:	0	0	4,053	3,919	0,00	0,00	0,00	0,00
Altura de edificios (Plantas)	4	4	,100	,085	0,40	0,34	0,40	0,34
% superficie acristalada	25	35	,083	,102	2,08	2,55	2,91	3,57
Semáforo	1	1	1,442	2,333	1,44	2,33	1,44	2,33
Glorieta	0	1	2,933	2,944	0,00	0,00	2,93	2,94
Material fachada: piedra	0	0	-4,017	-4,026	0,00	0,00	0,00	0,00
Forma poligonal/irregular	0	0	1,986	1,422	0,00	0,00	0,00	0,00
Anchura_total	46,5	42	,013	-,006	0,60	-0,28	0,55	-0,25
N.º de carriles	4	6	-,490	,070	-1,96	0,28	-2,94	0,42
(Constant)			-17,82	-20,62				
TOTAL					21,806	21,421	21,145	23,143

Fuente: elaboración propia

**Tabla 8.** Resultados de la clasificación calle Embajadores

Variables	Punto 10	Punto 11	Coef. Grupo Leq1	Coef. Grupo Leq 2	Total Leq 1 Punto 10	Total Leq 2 Punto 10	Total Leq 1 Punto 11	Total Leq 2 Punto 11
Velocidad Media	20	20	,188	,200	3,76	4,00	3,76	4,00
Sentidos	2	2	11,808	11,778	23,62	23,56	23,62	23,56
Valor de pendiente	2	2	,672	,853	1,34	1,71	1,34	1,71
Vehículos estacionados a ambos lados:	0	1	4,325	3,409	0,00	0,00	4,33	3,41
Vehículos estacionados a un lado:	0	0	4,053	3,919	0,00	0,00	0,00	0,00
Altura de edificios (Plantas)	6	3	,100	,085	0,60	0,51	0,30	0,26
% superficie acristalada	30	35	,083	,102	2,49	3,06	2,91	3,57
Semáforo	1	0	1,442	2,333	1,44	2,33	0,00	0,00
Glorieta	1	0	2,933	2,944	2,93	2,94	0,00	0,00
Material fachada: piedra	0	0	-4,017	-4,026	0,00	0,00	0,00	0,00
Forma poligonal/irregular	0	0	1,986	1,422	0,00	0,00	0,00	0,00
Anchura_total	31,5	23	,013	-,006	0,41	-0,19	0,30	-0,14
N.º de carriles	7	4	-,490	,070	-3,43	0,49	-1,96	0,28
(Constant)			-17,829	-20,621				
TOTAL					15,336	17,789	16,760	16,017

Fuente: elaboración propia

El punto 16 pertenecería al grupo 1, ya que la puntuación de 16,760 es superior a la del grupo 2 que es 16,017.

La clasificación aquí es también correcta.

## REFERENCIAS

- [1] P. Perera Melero, "Ruido de Tráfico". *Revista del Colegio de Caminos, Canales y Puertos*. N° 12, pp. 32-39, 1989.
- [2] Bert Peeters, Gigsjan v. Blokland "The Noise Emission Model For European Road Traffic. Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment". [En Línea] Disponible <http://db.mp.nl/publications/vvv/IMA55TR-060821-MP10%20-%20IMAGINE%20Deliverable%20D11.pdf>, 2007
- [3] M. Ferran Aranaz, "SPSS para windows. Análisis estadístico" Madrid, Mc Graw-Hill / Interamericana de España, 1996, 480p.