

# Curso de Contaminación Atmosférica

## Contaminación por ruidos y vibraciones: Ruido Urbano

por el Prof. José Ignacio Sánchez Rivera

### EL RUIDO URBANO

#### I.- INTRODUCCIÓN

#### II.-LIMITES PROPUESTOS PARA LOS RUIDOS AMBIENTALES EN ALGUNAS NORMAS

#### III.-MEDIDA DE LA CONTAMINACION ACUSTICA EN UNA CIUDAD

El método de la retícula

Adapcaciones del método de la retícula

El método de viales

Periodicidad del ruido de tráfico

Variación diaria del ruido

Relación entre el ruido y nº de vehículos

Evolución del ruido originado por el ferrocarril

Otros índices de medida

T.N.I.

Lnp

## RUIDO URBANO

Vamos a centrar nuestra atención en los ruidos de la ciudad, ya que generalmente es en las zonas urbanas donde el ambiente ruidoso interfiere más en el hábitat cotidiano de los ciudadanos. Son varios los investigadores que se han dedicado a la evaluación del ruido en las ciudades llegando a la conclusión de que el ruido es uno de los principales problemas ambientales que acusa el ciudadano y que la mayor contribución al ruido en los ambientes urbanos procede del tráfico rodado, en torno a un 85%, siguiéndole en orden decreciente el ruido industrial, la construcción, obras públicas y el ruido comunitario. En el interior de las viviendas los porcentajes y el orden son distintos, aunque sigue figurando como fundamental el ruido de la circulación (50%).

Los generadores principales de ruido en los vehículos automóviles son el motor y los neumáticos. Los ruidos del motor (incluido el escape) han sido limitados gracias al esfuerzo de los fabricantes; incluso en los vehículos pesados se ha encerrado el motor en una verdadera caja con lo que su emisión de ruidos se ha limitado enormemente. En este momento no parece probable que se pueda seguir avanzando por este camino sin que los costes de la reducción hagan aumentar el precio de los vehículos de forma significativa obteniendo, por contra, resultados exigüos. Sin embargo, muy poco se ha avanzado en la limitación de los ruidos de fricción firme - neumático, y éstos son más de la mitad de los emitidos a partir de 50 km/h. En este campo es donde ahora se dirigen las investigaciones, desarrollando mezclas porosas que absorban el sonido emitido por los neumáticos del vehículo y alcanzando resultados prometedores. El principal inconveniente de este sistema es la degradación del firme al cabo de pocos años debido a la deformación originada por el peso de los vehículos, que aplasta la superficie de rodadura suprimiendo los poros. Con todo, es ésta una de las áreas de investigación más prometedoras en los próximos años.

Aun asumiendo que en los núcleos urbanos el ruido producido por la circulación sea el factor principal como fuente emisora es necesario hacer algunas puntualizaciones sobre otros tipos de fuentes que últimamente se están prodigando y que ocasionan un malestar y crispación generalizada en el vecindario próximo. Es el caso de lugares de esparcimiento y ocio, como bares musicales, discotecas, etc, con instalaciones acústicas inadecuadas. Además, estas emisiones suelen ser por la noche con lo que el efecto es aún más pernicioso.

Es un hecho constatado que el individuo puede transigir, en condiciones normales, ante niveles altos de ruidos durante el día y, sin embargo, se vuelve más irascible y nervioso ante niveles de ruidos relativamente menores cuando se retira a descansar. Por ello en las legislaciones y normativas de los distintos países se diferencia entre día y noche cuando se trata de establecer los máximos niveles tolerables.

### LIMITES PROPUESTOS PARA LOS RUIDOS AMBIENTALES EN ALGUNAS NÓRMAS

Según la norma DIN (Alemana) e ISO (Internacional), a la hora de especificar el nivel de ruidos se deben fraccionar las 24 horas en dos períodos: de 6 a 22 horas uno y de 22 a 6 horas otro, que intentan diferenciar las horas de actividad de las horas de descanso. Para España, la norma UNE 74-022-81 y la NBE-CA-88 especifican que el período diurno es de 8 a 22 horas y el nocturno de 22 a 8.

Se establecen valores máximos tolerables de 65 dB(A) para el período diurno, según la norma DIN, y entre 55 y 65 dB(A) para la norma ISO. Para el período nocturno se establecen respectivamente valores máximos comprendidos entre 50 - 55 dB(A) para DIN y 40 - 55 para la ISO. Nuestra normativa nacional y las ordenanzas municipales adoptan, si no plenamente, sí en la generalidad de los casos la norma ISO.

El Departamento de la Vivienda y Desarrollo Urbanístico de EE.UU. utiliza el Lnp y establece tres niveles: hasta 62 dB(A) se considera plenamente aceptable, hasta los 88 dB(A) aceptable y totalmente inaceptable para valores mayores.

El T.N.I. se usa casi exclusivamente en Inglaterra y aquí, no en todos los casos, y se propone que frente a una fachada edificada no se sobrepase el valor de 74 dB.

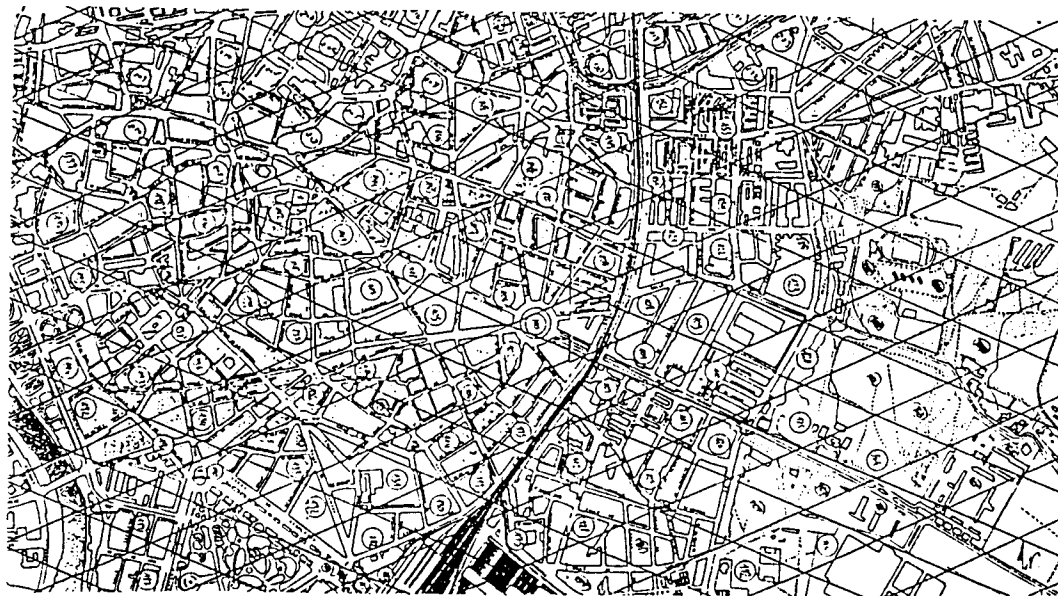
#### MEDIDA DE LA CONTAMINACION ACUSTICA EN UNA CIUDAD

Las primeras mediciones de ruido de la ciudad de Valladolid datan de mediados de la década de los ochenta, cuando las autoridades municipales en materia de salud pública se decidieron por la medida y control de la contaminación acústica. Para realizar la medida del ruido se utilizó un equipo portátil consistente en un sonómetro con micrófono incorporado y un trípode. Se colocaba el conjunto en la acera de las calles, a 1.5 m de altura y se medía en períodos de 15 minutos y a diferentes horas del día el Nivel Continuo Equivalente.

Entonces, tal como ahora (1994), aún no había nada legislado en materia de control de ruido de tráfico. Es ahora el momento en que se está debatiendo acerca de la conveniencia del método de la retícula o del de viales.

#### El método de la retícula

La elección de los puntos de muestreo se hizo utilizando el método de la retícula. Dicho método consiste en tomar un plano de la ciudad y superponerle una trama (la retícula) quedando determinados automáticamente unos puntos sobre el plano, los nudos de la retícula, donde se realizaron las medidas.



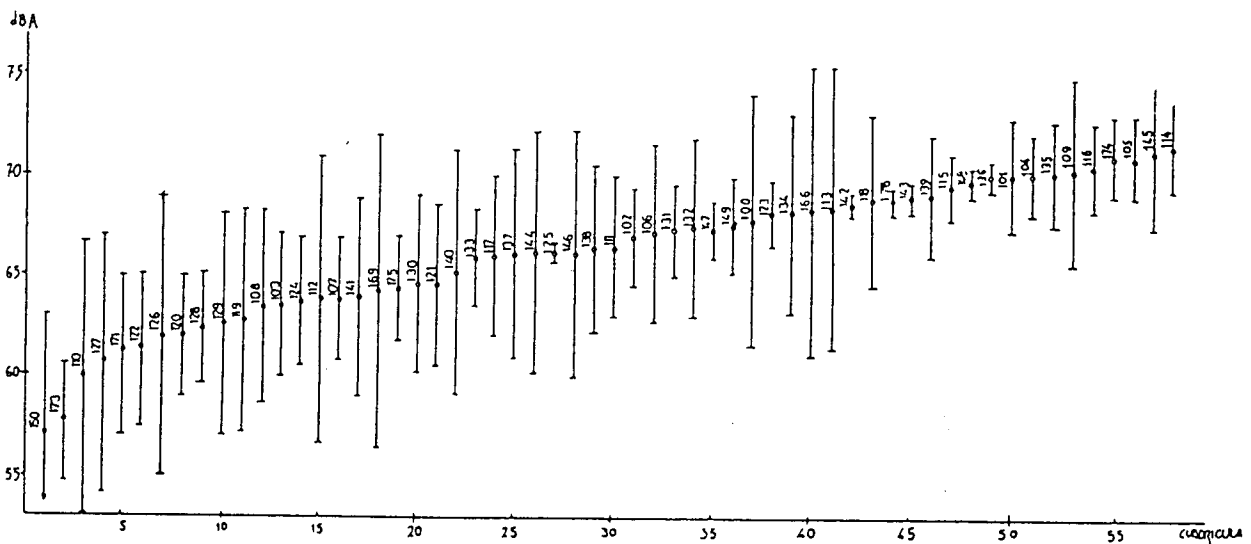
*Retícula aplicada a la ciudad de Valladolid*

Esta es la base del comúnmente llamado método de la retícula, con el que se han realizado mediciones de ruidos en un buen número de ciudades tanto españolas como extranjeras. La ventaja de este método reside en que no se interfiere en la elección de los puntos de medida, cayendo estos de forma aleatoria sobre un conjunto de calles de la ciudad sin intervención de la elección humana, con lo que se consigue un conjunto de datos que

expresa, de forma general el ambiente de ruido de una ciudad. Esa es la gran ventaja del método, de forma que si cambiásemos la retícula de posición o de orientación sobre el plano mediríamos sobre otros puntos pero el resultado general sería el mismo. ¿Y cuál sería el resultado a extraer de estas medidas? Pues conocer qué tanto por ciento de puntos están por encima de 40 dB, cuántos por encima de 50, de 60, etc. Y recíprocamente, podemos saber a qué niveles de ruido está sometido un tanto por ciento de la población. Pero como vemos la información, con ser importante, es absolutamente general.

El problema viene cuando queremos asignar un valor de ruido en dB a un área concreta de la ciudad donde fue realizada la medida. En Valladolid se realizaron, dentro del espacio de cada retícula varias mediciones: del orden de 4 o cinco puntos en cada área que delimitaba la retícula. Pues bien, dentro de cada área encontramos los valores más dispares de modo que de haber caído el nudo de la retícula en otro punto el resultado hubiera sido totalmente distinto. Recíprocamente, dado un valor en decibelios, no podríamos decir en qué punto de la ciudad ha sido tomado: en cualquier cuadrícula de la ciudad podemos encontrar tanto los valores más bajos o más altos.

En resumen, el método de la medida sobre una retícula da buenos resultados acerca del nivel sonoro general a que está sometido, superficialmente, un núcleo de población, pero no dice nada sobre la distribución espacial de los ruidos.



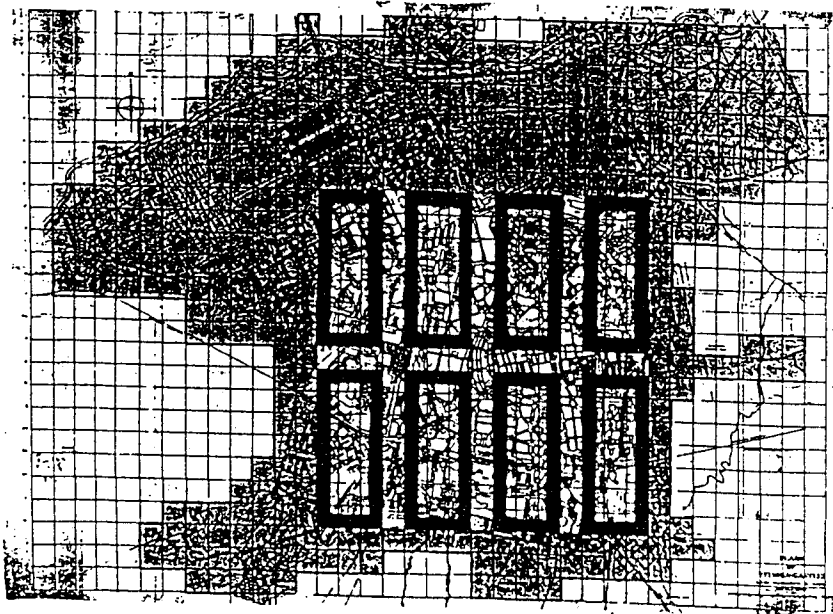
Lea medio de cada cuadrícula (cuyo número se indica) y cota de desviación típica correspondiente.

### Adaptaciones del método de la retícula

Otros investigadores han tratado de mejorar el método haciendo una media de los valores de ruidos obtenidos dentro de una retícula. Así se realizó una meticulosa campaña de medidas en Vitoria ejecutada por un equipo del Dptº de Física Fundamental de la U. Politécnica de Valencia. Los resultados pueden ser más precisos, pero el precio de la campaña se dispara espectacularmente al aumentar el número de puntos de medida (704 en el caso de Vitoria).

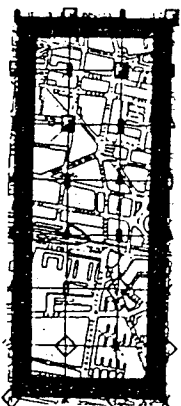
Para evitar este problema se dividió la ciudad en dos zonas: una periférica donde la actividad es preferentemente industrial (polígonos) o residencial (caseríos dentro del casco urbano) donde se tomarían menos muestras que en las zonas de uso del suelo más complejo (residencial, comercial, etc.) y donde la densidad de población es mayor y los niveles de ruidos

mayores; esta zona de denominaría de Intensificación de medidas (I.M.). Como vemos, a pesar de lo aséptico de modelo se imponen ciertas intervenciones por parte del que ejecuta el muestreo.



*Mallas centrales de la medida de ruidos de Vitoria*

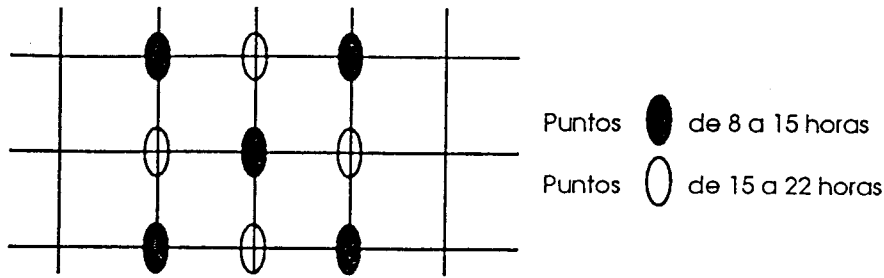
En cada retícula se midió el Leq y la distribución estadística de niveles a diferentes horas del día durante un intervalo de tiempo de 10' + 5' de traslado e instalación de la estación, de forma que cada malla se podía realizar en una Jornada de 8 a 21.15 horas. Se realizaron medidas en cada malla durante 3 Jornadas consecutivas para tomar tres muestras de cada punto a tres horas distintas. La estrategia empleada para el período nocturno y la medida en fin de semana no difería sensiblemente de ésta, salvo que el número de medidas tomadas era menor y menor era también la duración de la muestra.



*Esquema horario para la medida de una malla en Vitoria*

	1ª JORNADA	2ª JORNADA	3ª JORNADA
■	De 8.00 a 9.15	De 13.30 a 14.45	De 10.30 a 12.00
■	De 10.00 a 11.30	De 8.30 a 9.45	De 13.00 a 14.15
×	De 13.00 a 14.15	De 10.30 a 12.00	De 8.15 a 9.30
○	De 15.45 a 17.00	De 20.00 a 21.15	De 17.30 a 19.00
△	De 17.30 a 19.00	De 15.15 a 16.45	De 20.30 a 21.45
◇	De 20.00 a 21.15	De 17.15 a 18.45	De 15.30 a 16.45

La medida se realizó en el vial más cercano al punto que determinaba la retícula en el plano. Como se pretendía asignar a cada zona geográfica un valor en dB de nivel sonoro se procedió de forma que la distribución de las estaciones de medida fuera como muestra la figura:

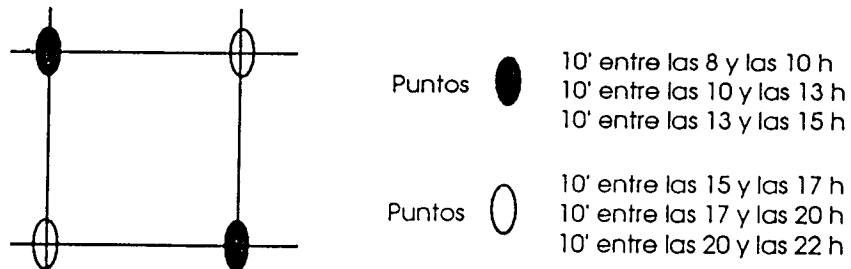


*Toma de muestras del período diurno*

Por otro lado, como en cada punto se toman tres medidas en tres jornadas, la mañana y la tarde se dividen a su vez en tres intervalos cada uno, a saber:

de 8 a 15 horas:	8-10	de 15 a 22 horas:	15-17
	10-13		17-20
	13-15		20-22

Estos seis intervalos en que se divide el período diurno obedecen al ciclo de actividad urbana, entendiéndose como horas punta las primeras y últimas de la mañana y de la tarde. El tiempo de muestreo para cada cuadrícula será el mostrado por la figura:



*Tiempo total de medida en período diurno para una cuadrícula*

Para cada cuadrícula se dispone al final de hasta 24 valores del Leq en período diurno, los cuales fueron tratados estadísticamente para obtener el Leq global de cada cuadrícula en el que pesaran los de las cuatro esquinas de la cuadrícula.

Con todo, y a pesar de la metódica preparación de las mallas para optimizar el tiempo de toma de datos, el trabajo de campo ocupó a un equipo durante más de tres meses, y las conclusiones siguen teniendo las limitaciones antedichas: la asignación de un valor de Leq a toda una superficie de terreno no permite pensar que toda ese área tenga ese Nivel.

#### El método de viales

Cuando nos enfrentamos al problema de medir por nuestra parte el ruido en la ciudad nos vimos en la necesidad de enfocarlo desde una perspectiva distinta a la anterior y nos decidimos por un método de los llamados genéricamente de medida de viales. Este método consiste en medir directamente sobre unos viales preseleccionados (entra aquí, por lo tanto, la influencia del elector), pero siguiendo una estrategia predeterminada y no una selección arbitraria y anárquica. En un caso general se mediría sobre todo el conjunto de la trama

circulatoria.

Se aplicó a la ciudad de Valladolid y comenzó haciéndose un estudio urbanístico de la ciudad donde se determinó cuál había sido el origen y evolución del viario hasta llegar a la situación actual, llegando a la conclusión de que en esta ciudad, y seguramente que no en otras, los viales se podían clasificar en unos grupos que serían los siguientes:

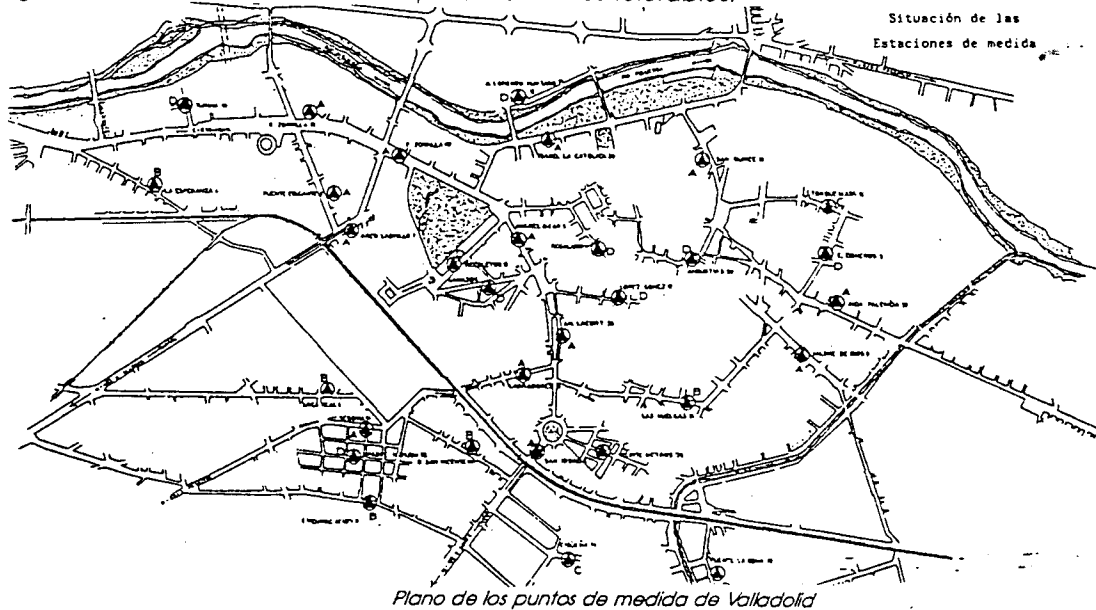
- Vías de entrada salida de la ciudad: antiguas carreteras hoy absorbidas dentro del trazado urbano.
- Antiguos caminos de interconexión de éstos, hoy también convertidos en calles.
- Vías de interconexión de modernas barriadas densificadas desde la década de los años 50.
- Viario interior dentro de los polígonos delimitados por los tres anteriores.
- Ruidos del ferrocarril.

Nótese que aquí no se miden ruidos de aviación y ruidos industriales, ya que la medida se ha centrado en el tráfico rodado. El equipo de medida consistió en un micrófono de exteriores y un analizador estadístico al que se conectaba. El conjunto se dejó durante las 48 horas del muestreo en balcones de las primeras plantas de edificios de viviendas, situando el micrófono fuera de la línea de fachada.

Se realizó una campaña de medidas de ruidos midiendo en 34 puntos, para una ciudad que está en torno a los 400.000 habitantes. En cada uno de los puntos se midió durante 48 horas seguidas, obteniendo datos cada media hora. Vamos a exponer aquí algunos de los resultados obtenidos y que consideramos que pueden ser representativos de otras ciudades similares (véase plano).

Las calles concretas en que efectuamos las medidas se exponen en la tabla donde podemos ver, a modo de ejemplo, los valores del  $L_{eq}$  en dB(A) máximos y mínimos ordenados de mayor a menor. Obsérvese que sólo en 8 puntos de los 34 el nivel está por debajo de 55 dB(A) y que este valor se obtiene por la noche cuando el valor límite tolerable es de 55 dB(A) según norma ISO. El valor límite para el día, 65 dB(A), es superado al menos en algún momento, en todos los casos menos en la calle Turina, correspondiente a un barrio exclusivamente residencial de principios de los sesenta.

Los valores obtenidos para los distintos índices dan como resultado que en la generalidad de los casos se sobrepasan los límites tolerables.



En cuanto a la hora concreta de aparición de máximo y mínimo, tomando los listados de valores de Leq para cada punto de medida, y representando las frecuencias en un histograma de frecuencias de la figura, observamos en ella que la aparición de mínimo se sitúa en torno de las 4.30 horas, mientras que la hora de aparición del máximo Leq presenta un perfil mucho más complejo, distribuyéndose prioritariamente sobre las 14 horas, en tanto que aparecen otras crestas secundarias a las 9.30 horas y entre las 17 y las 18.30.

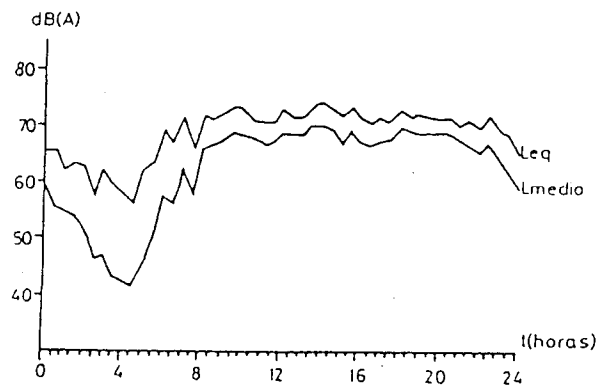
MAXIMO		MINIMO		D	
Arco Ladrillo	78.5	Arco Ladrillo	65.0	P. Manjón	27.0
Pº. San Isidro	77.0	Pº. Zorrilla, 40	63.0	C. Cisneros	23.0
López Gómez	77.0	Pº. San Isidro	63.0	Regalado	21.5
Pº. San Vicente	76.0	Pº. San Vicente	62.5	Turina	19.5
San Quirce	75.5	Avda. de Irún	62.0	A.L. Hurtado	19.5
Avda. Segovia	74.5	San Quirce	60.5	Las Huelgas	18.5
FFCC	74.0	J.M. Lacort	60.5	Circunvalación 87	18.5
Circunvalación 11	74.0	Arca Real	60.0	Avda. Segovia	18.5
Arca Real	74.0	Puente Colgante	60.0	Pte. la Reina	17.5
Puente Colgante	74.0	Pº Zorrilla, 76	60.0	Avda. Palencia	17.5
J.M. Lacort	74.0	Pº Isabel Católica	59.0	Circunvalación 11	17.0
Madre de Dios	74.0	Recoletos	58.5	Angustias	17.0
Circunvalación, 87	74.0	Labradores	58.0	FFCC	16.5
Las Huelgas	73.5	Miguel Iscar	58.0	Gamazo	16.0
Pº. Zorrilla 40	73.0	Madre de Dios	58.0	C. Esperanza	16.0
Gamazo	73.0	C. Torquemada	57.5	Madre de Dios	16.0
Veinte Metros	73.0	FFCC	57.5	Cigüeña	16.0
Pº Zorrilla 76	73.0	Veinte Metros	57.5	Veinte Metros	15.5
Miguel Iscar	73.0	Circunvalación, 11	57.0	C. Torquemada	15.0
Avda. Irún	73.0	Gamazo	57.0	San Quirce	15.0
C. Esperanza	73.0	C. Esperanza	57.0	Miguel Iscar	15.0
Cigüeña	73.0	Cigüeña	57.0	Labradores	14.5
C. Torquemada	72.5	Avda. Segovia	56.0	Arca Real	14.0
Pº Isabel Católica	72.5	López Gómez	56.0	Pº San Isidro	14.0
Labradores	72.5	Angustias	55.5	Pte. Colgante	14.0
Angustias	72.5	Circunvalación 87	55.5	Pº San Vicente	13.5
C. Cisneros	72.0	Las Huelgas	55.0	Arco Ladrillo	13.5
Pte. la Reina	72.0	Pte la Reina	54.5	Pº Isabel Católica	13.5
Avda. Palencia	70.5	Avda. Palencia	53.0	J.M. Lacort	13.5
Recoletos	70.5	A.L. Hurtado	50.5	Pº Zorrilla, 76	13.0
P. Manjón	70.0	C. Cisneros	49.0	Recoletos	12.0
A.L. Hurtado	70.0	Regalado	48.0	López Gómez	11.0
Regalado	69.5	P. Manjón	43.0	Avda. Irún	11.0
Turina	62.5	Turina	43.0	Pº Zorrilla 40	10.0

TABLA: Valores máximos, mínimos y diferencia bruta del Leq en dB(A)

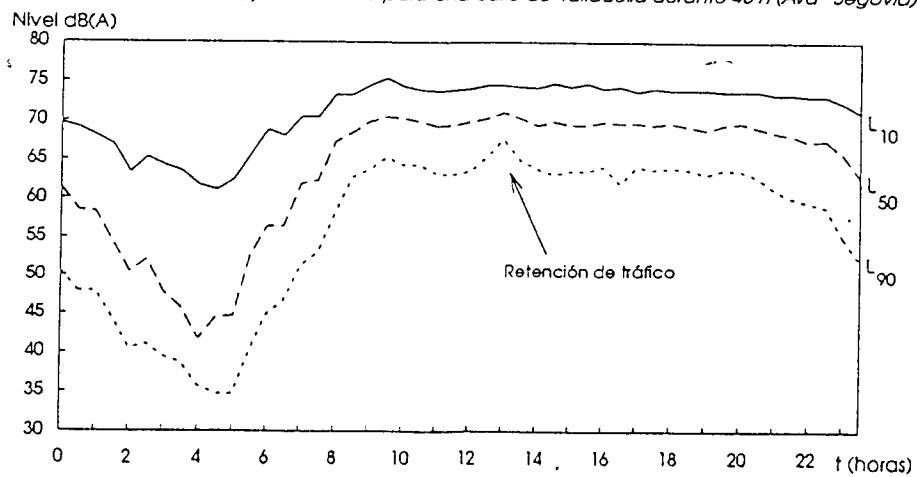
Este resultado se explica a partir de la forma de la onda diaria de Leq, con la región de las 8 a las 20 horas en la que se alcanzan valores elevados, allí donde se encuentran los máximos, que se corresponde con el período de mayor actividad ciudadana. Siendo variable y diversa esta actividad, la aparición del máximo nivel es también variable en ese intervalo de tiempo.



las 4 de la madrugada aproximadamente (hora oficial) en que vuelve a ascender hasta las 8 de la mañana. Creemos que el pequeño pico que aparece en torno a las 6 y 7 horas se debe al movimiento que originan las entradas de por la mañana en las distintas fábricas y lugares de trabajo.

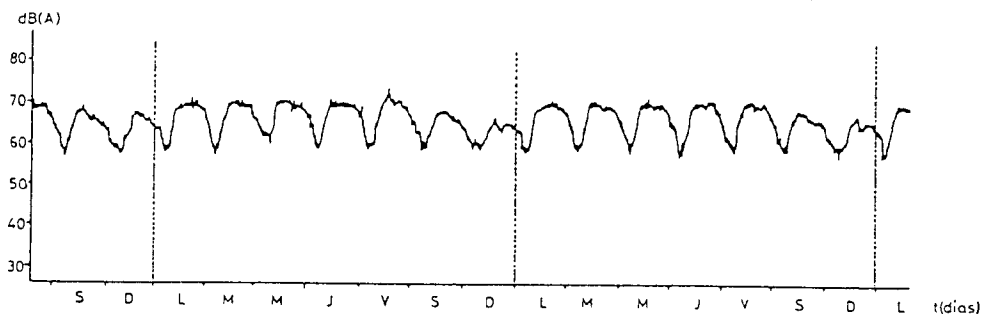


Percentiles, Leq y Nivel medio para una calle de Valladolid durante 48 h (Avd<sup>o</sup> Segovia)



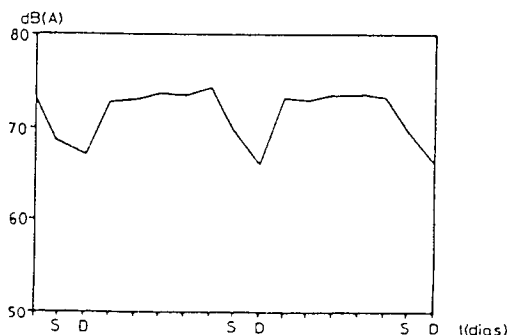
Lmedio y Leq de una calle de Valladolid (P<sup>o</sup> Isabel la Católica)

Para conocer la periodicidad a mediana escala se realizaron las medidas en períodos de media hora, al final de los cuales el analizador emitía un resumen con el  $L_{10}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{90}$ ,  $L$  medio,  $\sigma$  (desviación típica) y  $Leq$  de esa media hora. La estación se mantuvo funcionando ininterrumpidamente durante día y noche en un período de 17 días que comprendía 3 fines de semana, sin ningún festivo entre semana. Los datos de  $Leq$  se recogen en la figura que, por la característica forma que presenta, llamaremos "onda de ruido".



*Representación del  $Leq$  medido durante 17 días consecutivos*

El cálculo del  $Leq$  diario, que se representa en la figura, permite apreciar que los sábados y domingos el nivel desciende apreciablemente frente al  $Leq$  del resto de los días de la semana, en los que el nivel, además, tiene un valor prácticamente constante. Este comportamiento corresponde con una hábitos laborales de la población y no se han encontrados en otros lugares donde los movimientos responden a motivaciones comerciales o de ocio.



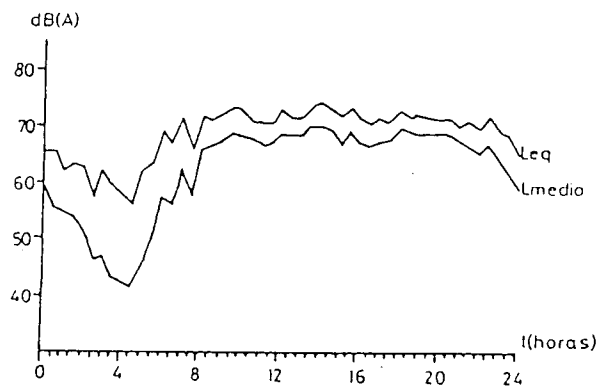
*$Leq$  diario durante 17 días consecutivos*

#### Periodicidad del ruido de tráfico: variación diaria del ruido

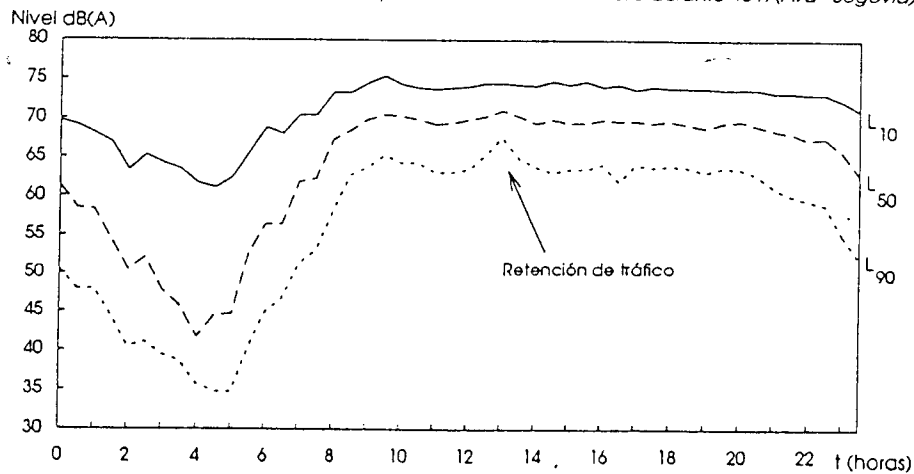
Otro resultado de interés es observar la variación del ruido a lo largo del día. El comportamiento general es similar en todos los casos salvo junto a la vía del ferrocarril. Como muestra de la evolución del ruido en una calle no influenciada por el ruido del tren, exponemos las gráficas de la figura que corresponde a la Avda. de Segovia. En la gráfica se observa la evolución de los parámetros estadísticos  $L_{10}$ ,  $L_{50}$  y  $L_{90}$ .

Estas gráficas se pueden dividir en dos zonas diferenciadas, una zona que abarcaría desde las 8 horas aproximadamente hasta las 20 horas donde el nivel de ruidos permanece prácticamente constante salvo pequeños altibajos consecuencia probablemente de atascos en algún caso y de otras situaciones esporádicas como aparcamiento, salida de coches, vehículos con mercancías para las tiendas, etc. La otra zona que abarcaría el resto del tiempo, desde las 20 h a las 8 h el nivel de ruido comienza un descenso más o menos continuado hasta

las 4 de la madrugada aproximadamente (hora oficial) en que vuelve a ascender hasta las 8 de la mañana. Creemos que el pequeño pico que aparece en torno a las 6 y 7 horas se debe al movimiento que originan las entradas de por la mañana en las distintas fábricas y lugares de trabajo.



Percentiles,  $L_{eq}$  y Nivel medio para una calle de Valladolid durante 48 h (Avd<sup>a</sup> Segovia)



$L_{medio}$  y  $L_{eq}$  de una calle de Valladolid (P<sup>a</sup> Isabel la Católica)

Hemos de hacer constar que las medidas se efectuaron en días laborables, de lunes a viernes. Además en la 2ª gráfica exponemos los valores del Leq y del nivel medio L obtenidos para el mismo lugar.

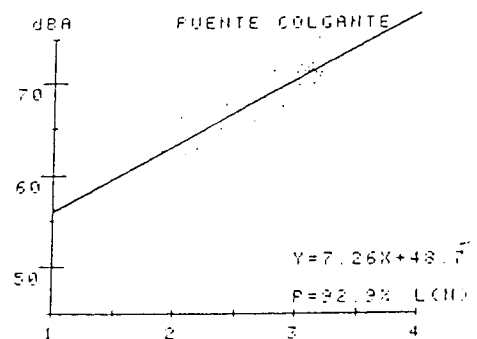
A la vista de los datos es curioso observar algunos detalles como el paso del servicio de limpieza o los que denominamos picos laborales a las 6 y las 7 como casos más frecuentes, en las calles que conducen a los lugares de trabajo industrial, así como horas punta en algunas calles, retención del tráfico en calle Isabel la Católica en torno a las 13 horas, etc.

#### Relación entre el ruido y el número de vehículos

Según estudios realizados, la mayor parte del ruido en las zonas urbanas proviene del ruido del tráfico. Si ello es así, debe existir una fuerte correlación entre el ruido medido y el número de vehículos que circulan por la calle. Para comprobar este hecho, hemos representado en una gráfica puntos que tienen por abscisa el valor del ruido y por ordenada el log del nº de vehículos/h (log N) que circulan por esa calle. Los datos del número de vehículos, es decir los aforos, nos los ha suministrado la Jefatura de Tráfico de la ciudad.

Se ha podido efectuar esta representación para el caso de cinco calles encontrando una correlación entre el valor del ruido y el log N muy estrecha en todos los casos. A título de ejemplo exponemos la gráfica obtenida para la calle Puente Colgante. En ella se observa una nube de puntos que se ajusta a una recta con un coeficiente de correlación de 0,93. Esto viene a corroborar la suposición de que el ruido existente y el tráfico están muy relacionados.

Ello ha llevado a múltiples investigadores, especialmente en Italia y Alemania a tratar de calcular el ruido mediante el conteo de los vehículos que pasan por un determinado punto. El método ofrece innegables ventajas, ya que no precisa de personal especializado para realizar la medición, y ésta puede hacerse mediante unos nada sofisticados aparatos (los aforímetros) abandonados en la vía pública sin más protección que una cadena de anclaje a una luminaria o a una señal de tráfico.



Relación Log (N)/ Nivel sonoro para una calle de Valladolid

Sin embargo, el mismo número de vehículos puede dar valores de ruido muy diferentes, ya que no es lo mismo que la calle esté cuesta arriba o cuesta abajo, que haya un semáforo en las inmediaciones, el tipo de firme, la cercanía de los edificios (que pueden estar ausentes en uno o en los dos flancos del vial), etc. Por eso los investigadores han estado trabajando en determinar la influencia de estas variables para poder producir una fórmula que nos dé el número de decibelios cuando conocemos el número de vehículos. El principal problema existente es discernir entre vehículos pesados y ligeros, lo cual no es posible en muchos casos más que de una forma aproximada. Por eso lo mejor es hacer una medida previa simultánea de

número de vehículos y decibellos que nos dé, para ese viarlo en concreto, la información necesaria para poder obtener la gráfica aludida, en la que número de vehículos y decibellos se alinean en una recta. En forma general la fórmula, en dB(A), es como sigue:

$$Leq = \alpha + 10 \log (N_L + 8N_W) + 10 \log (d_o/d) + \Delta L_V + \Delta L_F + \Delta L_B + \Delta L_S + \Delta L_G + \Delta L_{VB} \text{ dB(A)}$$

Donde cada uno de los términos indica la siguiente magnitud:

Leq.- Es el Nivel Continuo Equivalente, en dB(A), producido por el flujo del tráfico circulante sobre la calle. Tal Nivel tiene en cuenta la presencia de edificios en las inmediaciones que pudieran perturbar el campo sonoro. En ausencia de edificios se calcula a una distancia standard de 25m hasta el centro de la calzada (llamada  $d_o$ ).

$N_L$ .- Flujo o aforo de vehículos ligeros, considerando como tales los turismos y los comerciales de peso inferior a 4,8 toneladas.

$N_W$ .- Aforo de vehículos pesados, comprendiendo en ellos los de más de 4,8 toneladas, los de transporte público y las motocicletas de elevada emisión sonora.

d.- Es la distancia en metros desde el punto de observación al centro de la calzada.

$\Delta L_V$ .- Es un parámetro que tiene en cuenta la velocidad media del tráfico, teniendo como valores los dados en la siguiente tabla:

Velocidad (km/h)	$\Delta L_V$ (dBA)
de 30 á 50	0
60	1
70	2
80	3
90	4

$\Delta L_F$  y  $\Delta L_B$  .- Son los parámetros de corrección debidos a las reflexiones del sonido sobre las propias fachadas y las del lado opuesto de la calle respectivamente, y son 2,5 dBA y 1,5 dBA.

$\Delta L_S$  . Es el parámetro que considera la influencia del tipo de firme por el que circula el tráfico rodado. Su valor está tabulado, y es:

Tipo de firme	$\Delta L_S$ (dBA)
Asfalto liso	-0,5
Asfalto rugoso	0,0
Hormigón	+1,5
Adoquinado	+4,0

$\Delta L_G$  .- Es el parámetro corrector por la pendiente que pudiera tener la calzada, parámetro que también ha sido tabulado:

Pendiente (%)	$\Delta L_G$ (dBA)
5	0
6	+0,6
Por cada unidad,	+0,6

$\Delta L_{VB}$  .- Es un parámetro aplicado en las condiciones límite de tráfico, es decir, cuando la velocidad es muy baja o está próximo un semáforo. En el primer caso (velocidad  $\leq 30$  km/h), su valor es -1,5 dBA, y en el segundo (proximidad de un semáforo), +1,0 dBA.

Los anteriores parámetros tienen validez para todos los países, particularmente para España, y han sido ampliamente verificados por la normativa oficial en la República Federal de Alemania. Mas los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  son de aplicación particular para cada país, dependiendo de las características de los vehículos circulantes y de los hábitos personales de los ciudadanos. Sus valores son los siguientes:

$\alpha$  .- Es el Nivel Sonoro Medio producido por un solo vehículo aislado.

$\beta$  .- Es un coeficiente de ponderación que considera el nivel más elevado que producen los vehículos pesados.

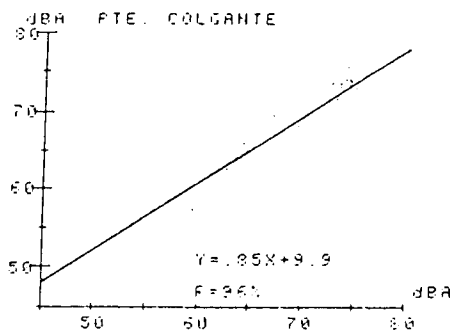
Este coeficiente  $\beta$  es necesario medirlo contando el número de vehículos pesados sobre el total de los circulantes (porcentaje de pesados). Los aforímetros instalados por la D.G.T. no son capaces de dar una medida de este porcentaje, pero medidas similares realizadas por Brambilla en Roma (1.984), dan un valor al  $\beta$  de 8, valor que nosotros consideramos como aplicable también en Valladolid. Para el coeficiente  $\alpha$ , propone Brambilla 35,1 dBA, cifra que aceptamos igualmente por la similitud del tipo de vehículo medio circulante por Italia y España, gran parte de los cuales corresponden a las mismas marcas e idénticos modelos.

Por lo tanto la ecuación del  $Leq$  a partir de las medidas de aforos nos queda planteada de la siguiente manera:

$$Leq = 35,1 + 10 \log(N_L + 8N_W) + 10 \log(d_0/d) + \Delta L_V + \Delta L_F + \Delta L_B + \Delta L_S + \Delta L_G + \Delta L_{VB} \text{ dB(A)}$$

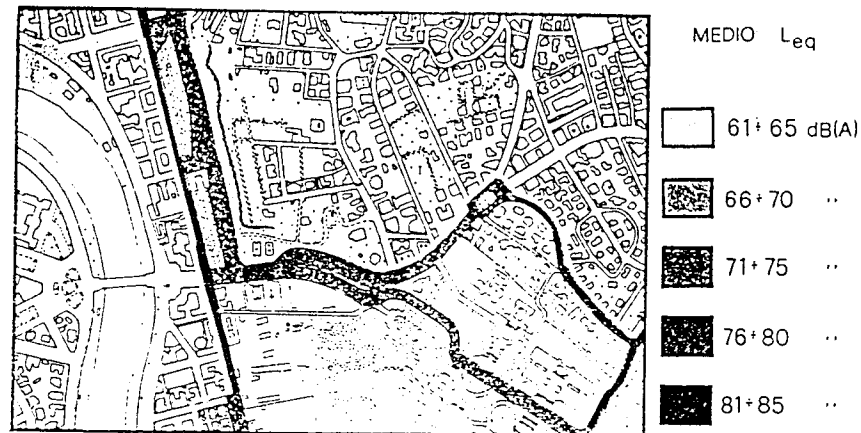
Calculamos de esta forma un  $Leq$ , que comparamos con el verdadero, medido in situ. El  $Leq$  calculado se extrae de las medidas de aforos realizadas simultáneamente a las de nivel. Con objeto de evitar la influencia que puedan tener sucesos ocasionales en alguna de las dos medidas, correlacionamos 24 valores del  $Leq$  calculado (un día, a partir de 24 valores horarios de aforos), con 24 valores de  $Leq$  experimental (un día, a partir de calcular el  $Leq$  de cada hora con los valores de las dos medias horas que la componen).

Los resultados se exponen en la figura. Observamos en todas ellas que el procedimiento de cálculo proporciona un  $Leq$  a partir de los datos de aforos que, con un nivel de confianza del 95%, se correlaciona con el experimental con un coeficiente de autocorrelación superior a 0,9 para todas las estaciones.



Correlación entre el Nivel teórico y el medido experimentalmente

Brambilla, cuando calcula los  $L_{eq}$  en Roma obtiene la recta  $y=x$  que correlaciona los  $L_{eq}$  calculados y experimentales, pero trabajando con valores de aforos en los que distingue hora a hora los porcentajes de pesados, ya que el contaje se hace directamente, debido a los cortos períodos de tiempo en los que se realiza. Sin embargo nosotros, al no contar con medidas simultáneas de pesados de la D.G.T., necesariamente hemos de encontrar alguna discrepancia de los  $L_{eq}$  calculados que, aunque no impide que la correlación sea alta, sí que hace cambiar, en forma variable, la pendiente y ordenada en el origen de la recta de ajuste.



*Plano del Nivel de ruido por vías en Roma obtenido a partir de aforos de vehículos*

Aún se podría afinar más si obtuviéramos los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  para el tráfico en España aunque, en lo referente al coeficiente  $\alpha$  no pensamos que pudieran variar grandemente respecto de los calculados para Italia, pues el parque de vehículos de ambos países presenta características similares y el medio en que se desarrolla el tráfico, la ciudad, presenta características culturales comunes.

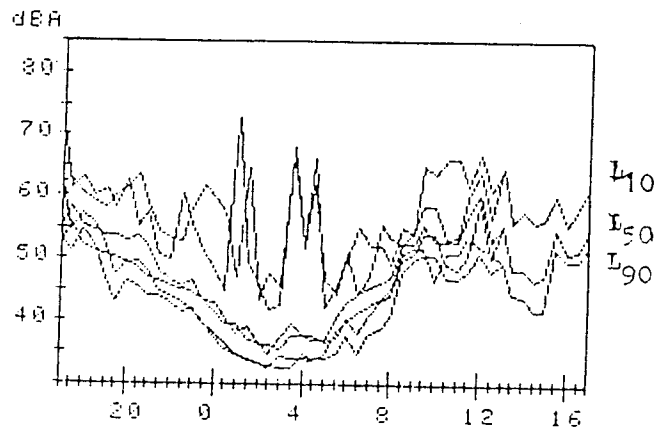
#### Evolución del ruido originado esencialmente por el ferrocarril

Se han realizado dos medidas de los ruidos originados esencialmente por el ferrocarril: una de ellas midiendo directamente a diez metros de distancia de la vía, y otra en la que medimos simultáneamente ruido de ferrocarril y de un vial de circulación de vehículos adyacente a las vías, con dos carriles.

A diferencia de lo expuesto en el apartado anterior, en cuanto a la superposición de valores diarios, en lo referente al ruido originado fundamentalmente por el ferrocarril no encontramos la misma periodicidad que se deducía de la medida en la Avd<sup>a</sup> de Salamanca.

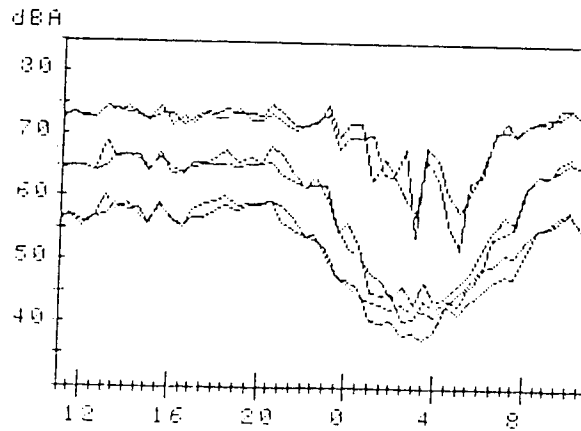
Para la medida directa sobre la vía del ferrocarril, cuyas gráficas de percentiles parecen en la figura, no se extrae ninguna periodicidad significativa a la vista de las medidas. Observamos que la evolución de los ruidos ya no sigue la misma tendencia a mantener un valor constante de 8 a 22 horas, sino que aparecen picos a intervalos de tiempo que entendemos son debidos a la periodicidad en el paso de los trenes, aunque con algún desfase de uno a otro día (variación en el horario real de los trenes, retrasos, etc).

En la figura, se observa un perfil crestado durante las 24 horas, suavizado durante las horas diurnas por la superposición del ruido circundante de la actividad urbana (tráfico rodado e Industrias). Durante la noche, los profundos valles en la gráfica corresponden a períodos en los que no se registró paso de trenes. Es interesante destacar que los picos son únicamente para el  $L_{10}$ , manteniéndose el  $L_{50}$  y  $L_{90}$  prácticamente constantes, lo que implica la existencia de ruidos de corta duración y gran intensidad, es decir, el paso de un convoy por las vías.



Percentiles tomados directamente de las vías del ferrocarril

Es muy esclarecedora la comparación con la siguiente figura, con datos tomados en la Avenida de Irún, donde sí que se detectó la presencia de la periodicidad diaria.



Percentiles del ferrocarril y un vial de circulación de vehículos adyacente

Téngase en cuenta que en los datos relativos a la vía no interviene apreciablemente el ruido de los vehículos y sin embargo en la Avda de Irún se superponen los ruidos procedentes del ferrocarril con los de la calle, de manera que de 8 a 22 horas se advierte la tendencia a la horizontalidad, propia de las vías de tráfico de vehículos, que ha han sido comentadas, en tanto que durante la noche aparece el perfil crestado característico del ferrocarril, con sus valles y picos y la gran separación entre los valores de  $L_{10}$  y los de  $L_{50}$  y  $L_{90}$ .

En resumen, las medidas de la estación de Avda de Irún corresponden a un régimen mixto, en el que en las horas diurnas existe una situación de predominio, en cuanto a ruidos, del tráfico rodado, en tanto que en las horas nocturnas parece ser determinante la presencia del ferrocarril.

Otros índices de medida: TNI y Lnp

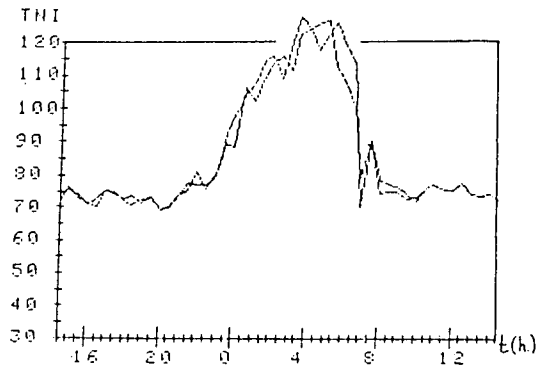
T.N.I.

Este índice tiene en cuenta las oscilaciones del Nivel, por medio del  $L_{10}$  y el  $L_{90}$ :

$$TNI = 4 (L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30$$

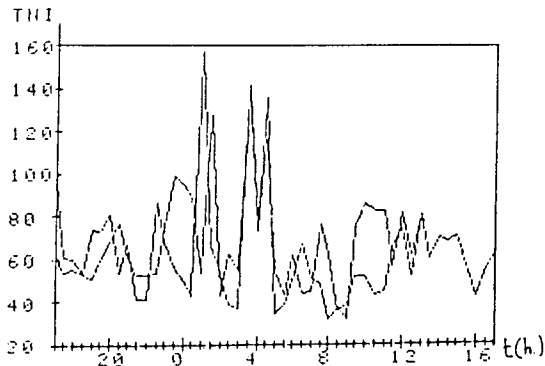


Caracterizan su comportamiento, a modo de ejemplo, la figura obtenida en el P<sup>2</sup> de San Isidro, vía de 6 carriles de circulación donde se origina una de las mayores medidas de Leq durante el período diurno, y que alcanza el mayor valor de TNI en el período nocturno.



*TNI del Paseo de San Isidro, con 6 carriles de circulación*

Comentario aparte merece la medida sobre la vía del ferrocarril, representada en la figura, donde las características propias del tráfico ferroviario (discontinuidad y alto nivel sonoro), produce L<sub>10</sub> elevados y L<sub>90</sub> de muy bajo nivel, de donde emanan valores de TNI extremos, dependiendo del paso o no de convoyes en ese período de tiempo (Obsérvese que aquí también fue necesario el cambio de escala).



*TNI medido sobre las vías del ferrocarril*

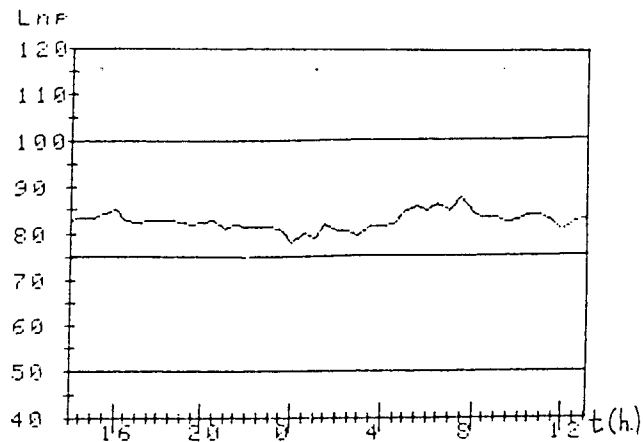
L<sub>np</sub>

Como es sabido, el L<sub>np</sub> no solo tiene en cuenta el Nivel Continuo Equivalente, Leq, sino también la desviación típica,  $\sigma$ , de los Niveles medidos; es decir, que contiene información sobre el Nivel y sobre las fluctuaciones en torno al nivel medio, de efecto psicológico tan molesto para el ser humano sometido a un ambiente ruidoso:

$$L_{np} = L_{eq} + (L_{10} - L_{90})$$

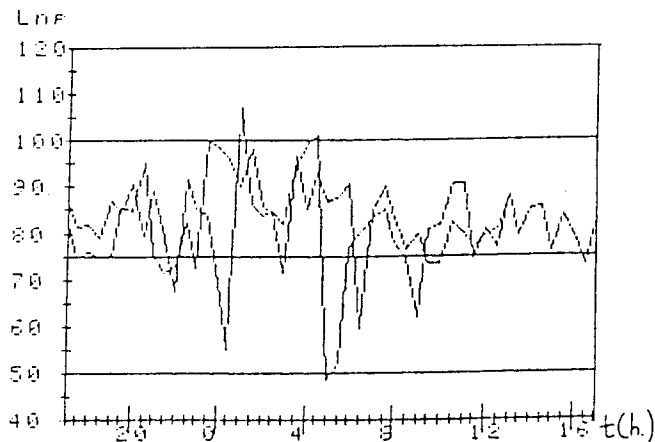
Las gráficas del L<sub>np</sub> obtenidas a partir de las medidas realizadas se exponen a continuación, donde aparecen superpuestos los valores de L<sub>np</sub> obtenidos a una misma hora. Debido a la periodicidad de las medidas que constituyen este índice, las gráficas muestran un acuerdo apreciable entre las medidas de uno y otro día.

En estas figuras podemos observar cómo el valor reducido del  $L_{eq}$  nocturno se puede ver en parte compensado por el aumento de  $\sigma$  durante este período, tal y como se aprecia en la figura correspondiente a la estación de P<sup>º</sup> de Zorrilla 40, donde el perfil nocturno iguala sus valores con el diurno, ya que éste período, al mantener las situaciones más estables de tráfico, mantiene también las varianzas menores.



*Lnp en el Paseo de Zorrilla 40*

En lo que hace referencia al ferrocarril, la figura nos muestra una evolución de este índice similar al TNI, con grandes altibajos y valores desacoplados para uno u otro día.



*Lnp para el ruido producido por el ferrocarril*