

---

## Caracterización del ruido del tráfico y propuesta de plan de control para vías arterias de la ciudad de Tunja, Colombia

### Characterization of traffic noise and draft control plan for arterial roads of the city of Tunja, Colombia

Julián Rodrigo Quintero González \*

*Grupo de Investigación y Desarrollo en Planeación y Operación del Transporte GIDPOT, Escuela de Ingeniería de Transporte y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sede Tunja, Colombia*

Recibido: 17/12/2015; revisado: 29/03/2016; aceptado: 13/06/2016

---

**Quintero González, Julián Rodrigo:** Caracterización del ruido del tráfico y propuesta de plan de control para vías arterias de la ciudad de Tunja, Colombia. *Jou.Cie.Ing.* **8** (1): 28-38, 2016. ISSN 2145-2628.

#### Resumen

Se presentan los resultados del estudio de contaminación acústica vehicular en los seis principales corredores viales de la ciudad de Tunja, Colombia, así como la formulación de estrategias para su control. El objetivo de la investigación es cuantificar los niveles de presión sonora e identificar las variables incidentes en la generación de ruido producido por el tráfico rodado para luego plantear un plan de acción. La metodología se basa en la categorización de las vías estudiadas, la medición de los niveles de presión sonora y la caracterización de los flujos vehiculares mediante estudios de ingeniería de tránsito; volúmenes vehiculares, velocidad media espacial e inventario rutas de transporte público. A partir de los resultados del comportamiento de las variables de presión sonora y flujo vehicular se identifican algunas medidas de control de ruido aplicables en el corto, mediano y largo plazo conformando un plan estratégico piloto para control de ruido producido por el tráfico en las vías arterias de la ciudad.

**Palabras Clave:** Categorización red vial, caracterización de flujo vehicular, volúmenes de tránsito, velocidad espacial, transporte público, ruido del tráfico rodado, medidas estratégicas de control.

#### Abstract

The findings of vehicular noise pollution in the six major road corridors in the city of Tunja, Colombia, and the formulation of strategies for their control are presented. The aim of the research is to quantify the levels of sound pressure incidents and identify variables in generating noise of the traffic and then propose a plan of action. The methodology is based on the categorization of the studied pathways, measuring sound pressure levels and the characterization of the traffic flow by traffic engineering studies; vehicle volumes, average speed and inventory of public transport routes. From the results of the behavior of variables sound pressure and traffic flow some control measures applicable noise in the short, medium and long term are identified forming a strategic plan pilot to control noise from traffic on arterial roads from the city.

**Keywords:** Categorization road network, characterization of traffic flow, traffic volumes, space speed, public transport, road traffic noise, strategic control measures.

---

\* [julian.quintero@uptc.edu.co](mailto:julian.quintero@uptc.edu.co), [jqinterog.itv@gmail.com](mailto:jrqinterog.itv@gmail.com)

## 1. Introducción

El transporte urbano produce impactos adversos que afectan el medio ambiente, la salud y la seguridad de los ciudadanos, a la economía, a la sociedad y en general, a la calidad de vida de la población que vive y desarrolla sus actividades laborales en las ciudades [1]. Así, la actividad del transporte genera impactos negativos como el consumo de energía, la contaminación por emisiones, partículas en suspensión, ruido, contaminación visual, ocupación del espacio público y accidentes. Entre estos, el ruido es uno de los que más efectos negativos ocasiona en la salud de las personas, trayendo consigo enfermedades de tipo fisiológico y mental, debido a la afectación del entorno urbano de quienes tienen contacto directo o se encuentran en áreas cercanas a las zonas dispuestas para el desarrollo de los flujos vehiculares en las ciudades. Según lo establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia [2], se puede definir el ruido acústico como: “Todo sonido no deseado por el receptor. En este concepto están incluidas las características físicas del ruido y las psicofisiológicas del receptor, un subproducto indeseable de las actividades normales diarias de la sociedad”.

A éste respecto, la implementación de planes estratégicos para el control del ruido es una buena alternativa para reducir el impacto ambiental producido por la actividad del transporte urbano, un objetivo deseable en un marco de movilidad sostenible y preservación del entorno ambiental. Los planes corresponden a un conjunto de medidas tendientes a reducir el nivel de contaminación acústica implementando diferentes estrategias [3,4], entre éstas se pueden resaltar las siguientes:

promoción del uso del transporte público; promoción de desplazamientos a pie y uso de la bicicleta; gestión del tráfico y estacionamientos; asignación de vías de circulación para vehículos pesados; gestión de vías de circulación; disminución de velocidad; renovación del parque automotor de servicio de transporte público y de carga; mejoramiento de pavimento en las vías; adecuada utilización de la topografía para aprovechar barreras naturales a la transmisión del ruido; bandas o pantallas de arbolado, barreras acústicas y aislamiento acústico; y planificación urbanística.

De acuerdo con lo anterior, y atendiendo a las actuales tendencias en cuanto al estudio del comportamiento del ruido producido por el tráfico vehicular, se realiza una investigación cuyos resultados se muestran en el presente artículo, la cual tiene por objeto el estudio de los niveles de presión sonora presentes en los seis principales corredores de viales y puntos con mayores condiciones de movilidad crítica en la ciudad de Tunja, Colombia. Adicionalmente, se busca el planteamiento de estrategias para el control del ruido del tráfico vehicular mediante la caracterización y análisis de las variables que influyen en su generación en cada uno de los corredores viales estudiados.

## 2. Materiales y Métodos

La metodología se basa en la caracterización de los niveles de presión sonora y la caracterización de los flujos vehiculares (volúmenes de tráfico, velocidad espacial y rutas de transporte público colectivo) en los principales corredores viales de la ciudad (ver figura 1).

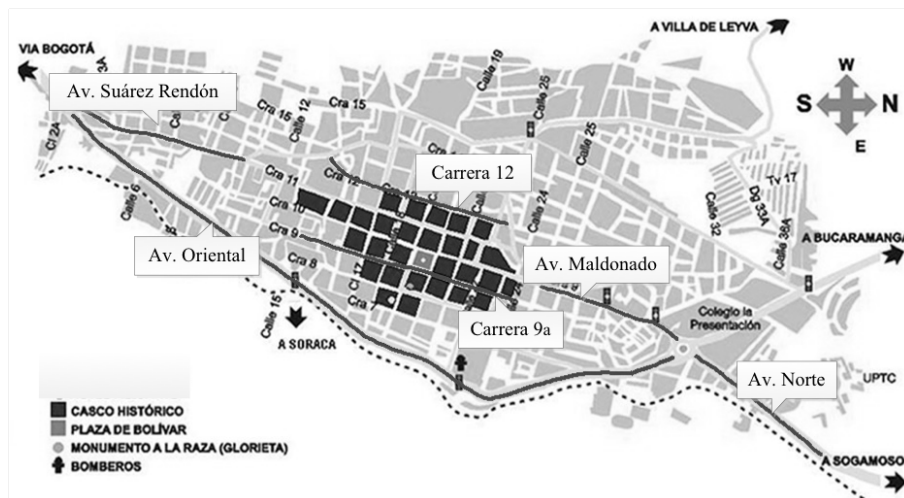


Figura 1. Ubicación espacial vías arterias ciudad de Tunja.

Se identifican los factores con mayor incidencia en la generación de ruido mediante el análisis comparativo entre variables.

### 2.1. Categorización de la red vial

Se selecciona en cada corredor vial el punto en el cual se considera se perciben las condiciones de movilidad crítica y altos volúmenes vehiculares más desfavorables, y que pueden ser el principal factor influyente en la generación de los mayores problemas de contaminación acústica. Para la categorización de los corredores viales se tienen en cuentas tres aspectos básicos:

1. La clasificación de la vía; por competencia, por sus características, según su funcionalidad, vías urbanas.
2. La geometría de la vía; ancho calzada, ancho carril, número de carriles, andenes y bermas.
3. La geometría de las obras complementarias; separador y cunetas.

### 2.2. Medición de los niveles de ruido

Se considera la necesidad de obtener lecturas de ruido en diferentes periodos de tiempo en cada punto considerado, variando los periodos de medición para lograr una amplia cobertura a lo largo de todo el día; entre las 7:00 a.m. y las 7:00 p.m. tal como lo establece la legislación colombiana vigente [2]. Así se definen tres horarios, compuestos cada uno por tres periodos de medición y conteo de dos horas, cuya combinación permite obtener una distribución de mediciones uniforme en periodos pico y periodos valle a lo largo del día. Éstos horarios, aplicados en forma aleatoria a grupos de dos corredores viales, permiten obtener datos correspondientes a seis horas de registro en cada punto estudiado (Tabla 1).

Localización punto	Horario mediciones de presión sonora y estudios de tránsito
Carrera 9 entre Calles 20 y 21	Horario 1
Avenida Oriental entre Calles 23 y 24	7:00 a.m. - 9:00 a.m.; 11:00 a.m. - 1:00 p.m.; 3:00 p.m. - 5:00 p.m.
Avenida Suarez Rendón entre Calles 8 y 9	Horario 2
Avenida Maldonado entre Calles 27 y 28	8:00 a.m. - 10:00 a.m.; 12:00 a.m. - 2:00 p.m.; 4:00 p.m. - 6:00 p.m.
Carrera 12 con entre Calles 19 y 20	Horario 3
Avenida Norte entre Calles 46 y 47*	9:00 a.m. - 11:00 a.m.; 1:00 p.m. - 3:00 p.m.; 5:00 p.m. - 7:00 p.m.

Tabla 1: Relación de puntos estudiados y horarios.

Para la medición de los niveles de ruido vehicular se usa el sonómetro de referencia modelo HD 600 de Extech Instruments (medidor digital de nivel de sonido con grabadora integral de datos), el cual, y de acuerdo con

las especificaciones del fabricante; Extech Instruments Corporation [5], se clasifica como de Tipo 2 [6–8] Se considera una escala de medición entre 30 dBA y 130 dBA para una ponderación de frecuencia “A”, bajo un tiempo de respuesta lento (1 segundo), el cual permite vigilar una fuente de ruido con un nivel de presión sonora razonablemente constante o para promediar niveles rápidamente cambiantes. Las condiciones ambientales de referencia son; humedad relativa: 90 % máx, temperatura de operación: 0 a 40°C (32 a 104°F). Para la posición del medidor respecto del corredor vial se consideran 1,5 metros de distancia del flujo vehicular y 1,20 m de altura sobre el piso. Las mediciones se realizan considerando intervalos de tiempo de 1 segundo, obteniendo de esta manera más de 7200 registros para un periodo de medición de 2 horas y cerca de 21600 registros a lo largo del día para cada punto estudiado.

### 3. Caracterización de los flujos vehiculares

#### 3.1. Volúmenes de tránsito

Conforme con lo expuesto por diversos autores en relación a la influencia de los flujos vehiculares como principal variable incidente en la generación de altos niveles de ruido del tráfico [9–12], se determinan los volúmenes de tránsito en forma precisa y simultánea en los mismos sitios y periodos de medición en los cuales se realiza la medición de los niveles de presión sonora. Esto con el fin de tener un acercamiento en cuanto a la magnitud de los flujos vehiculares que generan los mayores niveles de contaminación acústica en cada punto específico. Para la realización del estudio de volúmenes de tránsito se discrimina el tipo de vehículo en las siguientes categorías: automóvil particular, taxi, microbús (15 pasajeros), bus (25 pasajeros), camión (dos ejes liviano, dos ejes pesado, entre tres y seis ejes), motocicleta y bicicleta, relacionando el sentido de circulación de los vehículos registrados sobre el corredor vial.

#### 3.2. Velocidad media espacial

Respecto a las velocidades desarrolladas por los vehículos y su efecto directo en el aumento de los niveles de ruido al incrementarse la velocidad en los diferentes corredores viales [13, 14], es conveniente conocer el comportamiento del tráfico vehicular a partir de la estimación de la velocidad en un punto definido del corredor vial que se pretende estudiar. Para la medición de la velocidad espacial, y teniendo en cuenta las características de los corredores viales estudiados, se

considera un tamaño de muestra de 200 observaciones distribuidas en forma equilibrada entre los dos sentidos de circulación en los corredores viales que presentan dicha condición, para aquellas vías en las cuales solo se cuenta con un sentido de circulación se considera un tamaño de muestra de 150 observaciones. El método de registro empleado es el de cronómetro y base medida, la longitud base para el estudio y estimación de la velocidad espacial tiene un valor de 50 metros.

### 3.3. Inventario de rutas de transporte público colectivo urbano

La observación del transporte público permite evaluar la influencia de los volúmenes de tránsito en la generación de altos niveles de ruido [15], lo que pueden ser determinante a la hora de formular estrategias de control del ruido basadas en aspectos tales como la promoción del uso del transporte público, la gestión del tráfico, asignación de vías de circulación para vehículos y la gestión de vías de circulación [16]. Para la elaboración del inventario de rutas se considera la realización de un registro en forma simultánea a las mediciones de presión sonora y los conteos de volúmenes vehiculares, en el cual se consigna información como el número de la ruta, su recorrido, la empresa operadora del servicio de transporte, el tipo de vehículo y la hora de paso, esta última registrando hora, minutos y segundos. El tamaño de muestra considerado se constituye de 300 observaciones distribuidas en forma equilibrada en cada sentido de circulación en aquellos corredores viales que presentan dicha configuración y 200 en aquellos con un solo sentido de circulación.

### 3.4. Formulación de estrategias de control

Tomando como punto de partida los resultados obtenidos se identifican los factores incidentes en la generación de niveles de ruido vehicular, a partir de la literatura, análisis de casos de estudio y normatividad en el marco global y latinoamericano, se discriminan aquellas medidas aplicables a cada factor en particular. Posteriormente se seleccionan las acciones tendientes a mitigar el problema del ruido considerando 4 criterios;

1. Identificación de responsables y autoridades locales competentes.
2. Normatividad y niveles de ruido vehicular.
3. Medio físico y características de vías urbanas.
4. Características del tráfico vehicular, que permiten conformar un bosquejo de un plan piloto para el control de la contaminación acústica.

## 4. Resultados

### 4.1. Categorización de la red vial

La clasificación por competencia se tiene en cuenta como parámetro a ser considerado en el planteamiento de la participación de las diferentes entidades competentes que puedan ser involucradas en la formulación del plan de control de ruido vehicular. En la Tabla 2 se presenta la relación de los corredores viales estudiados y su clasificación según su jerarquía como vía urbana y según su competencia, además de las características físicas y geométricas de las secciones transversales; número de calzadas, ancho de calzada, carriles por sentido, ancho de carril, pendiente longitudinal, ancho de andén y ancho de separador. La totalidad de los corredores viales carecen de bermas y solo algunos poseen cunetas con anchos entre 0,80 m y 1,34 m y profundidad entre 0,07 m y 0,60 m, todos los corredores viales poseen estructura de pavimento flexible. En el tramo estudiado sobre la Avenida Oriental se encuentra una amplia zona lateral después del andén en el costado derecho en sentido de circulación sur-norte con una longitud de 5,00 m. De igual forma, en la Avenida Norte en sentido sur-norte se cuenta con una zona lateral en el costado izquierdo de 3,20 m, en sentido de norte-sur se cuenta con una zona lateral en el costado derecho igual a 4,00 m.

Corredor Vial	Localización (Calificación)	Calzadas	Ancho calzada (m)	Carriles por sentido	Ancho carril (m)	Pendiente longitudinal (%)	Ancho andén (m)	Ancho Sep. (m)
1	Av. Suarez Román (Arteria, Municipal)	2	6,10 N-S 6,15 S-N	2	3,05 N-S 3,08 S-N	-1,0 N-S -1,0 S-N	1,90 D 1,88 D	3,70
2	Carrera 12 Centro (Colectora, Municipal)	1	5,90 N-S 5,90 S-N	1	2,95 N-S 2,95 S-N	-1,0 N-S -1,0 S-N	1,30 D 1,45 D	—
3	Carrera 9° Centro, (Colectora, Municipal)	1	3,50 S-N	1	3,50 S-N	-5,0 S-N	2,35 D 2,35 D	—
4	Av. Maldonado (Arteria, Municipal)	2	6,50 N-S 6,54 S-N	2	3,25 N-S 3,27 S-N	6,0 N-S -6,0 S-N	1,35 D 2,60 D	2,98
5	Av. Oriental (Arteria, Municipal)	2	6,00 N-S 6,00 S-N	2	3,00 N-S 3,00 S-N	-1,7 N-S -1,7 S-N	0,97 D 1,33 D	4,95
6	Av. Norte (Autopista, Municipal)	2	7,80 N-S 7,40 S-N	2	3,90 N-S 3,70 S-N	1,0 N-S -1,0 S-N	1,04 D 2,00 D	3,97

Tabla 2: Geometría secciones transversales corredores viales área de estudio.

### 4.2. Caracterización de niveles de presión sonora y flujos vehiculares

Para el tratamiento de la información obtenida en campo mediante el empleo del sonómetro se determina el valor del nivel sonoro continuo equivalente Leq., medido en decibelios (dBA). Éste es el correspondiente a la misma cantidad de energía acústica que el ruido real considerado, en un punto determinado durante un período de tiempo t, para esto se emplea la ecuación 1.

$$Leq_A (db) = 10 * Log \left( \frac{\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}}}{N} \right), \quad (1)$$

dónde  $L_i$  = nivel sonoro continuo equivalente registrado en cada una de las mediciones realizadas durante el periodo de medición y  $N$  = número total de mediciones realizadas durante el periodo de medición.

El análisis del comportamiento de las variables ruido y volumen de tránsito, permite establecer que el nivel de presión sonora durante los periodos de medición se conserva a lo largo del día (Tabla 3), con lo cual, los altos

niveles de ruido vehicular encontrados no son una consecuencia inmediata de los altos flujos vehiculares que si registraron variaciones. Dichas variaciones oscilaron entre 2,0 dBA y 4,5 dBA entre periodos de medición. Esto puede señalar que los niveles de ruido por tráfico rodado están más relacionados con el paso repetitivo de tipos específicos de vehículos. Se puede observar que todos los niveles de ruido equivalentes estimados a partir de los datos de campo, exceden los niveles de ruido permisibles de acuerdo a la clasificación por tipo de sector consignada en la Resolución 0627 (2006) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [2].

Corredor vial	Horario de mediciones ruido y volúmenes	Niveles de presión sonora dBA		Flujo vehicular por sentido para niveles máximos de ruido, Veh. mixto/h
		Leq	Permisible	
Avenida Suarez Rendón entre Calles 8 y 9	8:00 a.m. - 10:00 a.m.	72,89	70,00 (Sector C)	846 S-N
	12:00 a.m. - 2:00 p.m.	75,23		920 N-S
	4:00 p.m. - 6:00 p.m.	72,32		825 S-N
Carrera 12 entre Calles 19 y 20	9:00 a.m. - 11:00 a.m.	76,65	65,00 (Sector B)	723 S-N
	1:00 p.m. - 3:00 p.m.	79,22		732 S-N
	5:00 p.m. - 7:00 p.m.	77,36		549 S-N
Carrera 9 entre Calles 20 y 21	7:00 a.m. - 9:00 a.m.	75,48	65,00 (Sector C)	1202 S-N
	11:00 a.m. - 1:00 p.m.	71,98		1252 S-N
	3:00 p.m. - 5:00 p.m.	72,88		1242 S-N
Avenida Maldonado entre Calles 27 y 28	8:00 a.m. - 10:00 a.m.	78,07	70,00 (Sector C)	1476 N-S
	12:00 a.m. - 2:00 p.m.	79,86		1672 S-N
	4:00 p.m. - 6:00 p.m.	80,81		1437 N-S
Avenida Oriental entre Calles 23 y 24	7:00 a.m. - 9:00 a.m.	74,87	65,00 (Sector B)	1579 S-N
	11:00 a.m. - 1:00 p.m.	73,65		1443 S-N
	3:00 p.m. - 5:00 p.m.	78,06		1478 N-S
Avenida Norte entre Calles 46 y 47A	9:00 a.m. - 11:00 a.m.	75,49	70,00 (Sector C)	2250 N-S
	1:00 p.m. - 3:00 p.m.	74,25		2736 S-N
	5:00 p.m. - 7:00 p.m.	74,87		2619 N-S

Tabla 3: Niveles de ruido en corredores viales, niveles permisibles y flujos vehiculares en periodos de medición. S-N: sentido sur-norte, N-S: sentido norte-sur

Se realiza un análisis de correlación considerando el método estadístico de Pearson y el análisis de varianza Anova, en donde se relacionaron los niveles de ruido continuo equivalente en periodos de 15 minutos y los volúmenes vehiculares, sin tener en cuenta el volumen de vehículos no motorizados como las bicicletas, las cuales no aportan a la generación de elevados niveles de ruido. Para la obtención de las correlaciones se emplea el programa estadístico SPSS Statistics Versión 19 (2010), considerando además un nivel de confianza

del 95 % (Significancia del 5 %, =0.05) para las estimaciones. Al analizar los valores de las correlaciones de Pearson para los distintos corredores viales estudiados, se puede plantear la existencia de cierta correspondencia con el análisis comparativo entre niveles de ruido y volúmenes vehiculares desde el punto de vista de la influencia de determinados tipos de vehículos en la generación de niveles de ruido vehicular. Éste es el caso de las correlaciones entre los vehículos de los tipos bus y taxi y el nivel de presión sonora en la Avenida

Suárez, las cuales, con un valor de 0,293 y 0,227 respectivamente, aunque se consideran correlaciones débiles, muestran la relación más importante entre volúmenes y ruido vehicular.

Otros ejemplos son las correlaciones de Pearson encontradas entre el nivel de presión sonora y los vehículos particulares (0,805), taxis (0,583) y camiones (0,530) en la Carrera 12; vehículos particulares (0,479), buses (0,488) y camiones (0,584) en la Carrera 9<sup>a</sup>; taxis (0,414) y camiones (0,113) en la Avenida Oriental y camiones (0,475) en la Avenida Norte. Sin embargo, al considerar los resultados de las significancias del análisis de varianza Anova, se puede afirmar con un nivel de confianza del 95 % que en conjunto, las variables predictoras no explica en forma adecuada el comportamiento de la variable respuesta “nivel de ruido”. Lo anterior puede ratificar la formulación de que los niveles de ruido vehicular son mayormente generados por los vehículos de transporte público y camiones de acuerdo a la distribución de los flujos vehiculares y la composición vehicular para cada corredor vial.

En relación al comportamiento de la velocidad espacial frente al ruido, y aplicando los conceptos básicos de la estadística descriptiva y las distribuciones de frecuencias, formulados por diversos autores [17–19], se determina el valor de las medidas de tendencia central;

velocidad media espacial, velocidad modal, velocidad mediana, además de medidas de dispersión y posición; percentiles 50, 85, 90 y 98. También se elabora un modelo de regresión lineal mediante el empleo de la aplicación “análisis de datos” del programa *Microsoft Excel*, con un nivel de confianza del 95 % (significancia del 5 %, =0.05), esto con el objeto de conocer la relación entre las dos variables.

Al confrontar los valores de velocidad media espacial con los niveles de ruido promedio en cada corredor vial no se logra vislumbrar en forma clara si existe relación o tendencia alguna, sin embargo, al contrastar los niveles de ruido con el valor de la pendiente longitudinal de la vía se puede observar que en gran parte de los casos los niveles de ruido más altos se presentan cuando la pendiente de la vía es positiva, la cual, al ser comparada con las velocidades espaciales permite apreciar que para pendientes importantes (sean positivas o negativas) se generan velocidades mayores con el objeto de contrarrestar el efecto de la pendiente cuando esta es positiva (desfavorable) y para aprovecharla cuando es favorable (negativa); en los dos casos, al aumentar la velocidad de marcha de los vehículos se genera un aumento en el nivel de presión sonora inducido por la aceleración del motor del vehículo (Tabla 4).

Corredor vial	Sentido de circulación	Pendiente long. ( %)	Niveles de presión sonora máximos ajustados dBA	Velocidad media espacial (km/h)	Velocidad mediana (km/h)	Percentil 50 (km/h)	Percentil 85 (km/h)
Avenida Suarez Rendón entre Calles 8 y 9	Norte-sur	1,0	75,23	18,10	17,69	17,69	23,15
	Sur-norte	-1,0	72,89	19,04	18,22	18,22	25,67
Carrera 12 entre Calles 19 y 20	Norte-sur	1,0	79,22	17,45	17,00	17,00	22,89
	Sur-norte	-1,0	77,36	11,73	10,50	10,50	18,47
Carrera 9 entre Calles 20 y 21	Norte-sur	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
	Sur-norte	-5,0	75,48	13,60	12,78	12,78	21,13
Avenida Maldonado entre Calles 27 y 28	Norte-sur	6,0	80,81	28,80	29,24	29,24	35,50
	Sur-norte	-6,0	79,86	27,75	27,45	27,45	35,41
Avenida Oriental entre Calles 23 y 24	Norte-sur	1,7	78,06	54,99	54,26	54,26	64,64
	Sur-norte	-1,7	74,87	61,96	61,78	61,78	76,33
Avenida Norte entre Calles 46 y 47A	Norte-sur	1,0	75,49	36,96	37,06	37,06	44,54
	Sur-norte	-1,0	74,25	39,18	38,87	38,87	47,75

Tabla 4: Velocidad espacial, velocidad mediana, velocidad modal y niveles de ruido.

Según los resultados encontrados en el modelo, y de acuerdo con el coeficiente de determinación R<sup>2</sup> (0,77857805), entendido como el porcentaje de variación de la variable dependiente explicado por la variable independiente en el modelo de regresión lineal, se puede señalar que aproximadamente el 77,86 % de la variación de los niveles de presión sonora se explica por medio de la velocidad media espacial en cada corredor vial.

En lo concerniente con el inventario de rutas de transporte público colectivo urbano, a partir del registro de

la hora de paso se calcula el intervalo entre vehículos y se estima el intervalo promedio de paso y frecuencia de paso para cada ruta en cada sentido de circulación en cada corredor vial. En la Tabla 5 se muestran los resultados del inventario, se sugiere existe una relación fuerte con los niveles de ruido vehicular considerando que son los vehículos de transporte público, los que debido a sus características mecánicas y de operación generan los mayores niveles de presión sonora en los principales corredores viales de la ciudad.

Corredor vial	Sentido de circulación	Nivel de presión sonora máximo (dBA)	Cantidad de rutas	Frecuencia, de paso (Veh./hora)	Intervalo de paso (seg.)
Avenida Suarez Rendón	Norte-Sur	75,23	14	120	30,00
	Sur-Norte	72,89	14	122	29,51
Carrera 12	Norte-Sur	79,22	8	69	52,17
	Sur-Norte		13	97	37,11
Carrera 9	Sur-Norte	75,48	17	144	25,00
Avenida Maldonado	Norte-Sur	80,81	17	191	18,85
	Sur-Norte	79,86	22	200	18,00
Avenida Norte	Norte-Sur	75,49	23	177	20,34
	Sur-Norte	74,25	24	173	20,81

Tabla 5: Niveles de ruido, inventario de rutas de transporte, frecuencia e intervalo de paso.

Se realiza un análisis de correlaciones entre el nivel de presión sonora y los intervalos y frecuencias de paso, éste se elabora a través de las correlaciones de Pearson, Tau b de Kendall y Rho de Spearman, utilizando para su determinación el programa SPSS Statistics Versión 19 (2010), considerando un nivel de confianza del 95 % (Significancia del 5 %, =0.05) para las estimaciones. Los resultados indican que el intervalo de paso estimado para las rutas de transporte en cada corredor vial (variable independiente) influye en forma inversa en la generación de los niveles de ruido vehicular, es decir, que en la medida que los vehículos de transporte estén sujetos a intervalos de paso más pequeños, mayor será la probabilidad de que niveles elevados de presión sonora se conserven en este estado por más tiempo a lo largo del día, suposición que concuerda con la interpretación de la correlación de Pearson (-0,780) con significancia (0,013), y puede apoyarse además en las correlaciones de Tau b de Kendall (-0,648) y Rho de

Spearman (-0,762) atribuidas a significancias con valores de 0,016 y 0,017 respectivamente

#### 4.3. Formulación de plan de control de ruido vehicular

La diversidad de enfermedades de tipo fisiológico y mental ocasionadas por el ruido vehicular, entre las que se cuentan trastornos auditivos, pérdida de la audición, hipoacusia, dificultad de la comunicación oral, estrés inducido por el tráfico, perturbación del sueño, enfermedades cardiovasculares, efectos en el sistema inmune, efectos en el embarazo y efectos en la salud mental y el comportamiento, permiten comprender la gran importancia que reviste el tratamiento de esta problemática y justifican la formulación e implementación de medidas para controlarla y mitigarla [20]. Los planes de acción para el control del ruido producido por el tráfico están orientados hacia el mejoramiento de la calidad de vida de las personas bajo la premisa de la preservación del

medio ambiente urbano y el desarrollo sostenible del transporte. Estas estrategias pueden ser a corto, medio o largo plazo, generando un impacto global beneficioso y otras sólo localizado [21]. Para la formulación de los planes de control se pueden considerar parámetros básicos como el uso del suelo, la construcción de nuevas vías, el desarrollo de nuevas áreas residenciales y el rediseño en aquellos proyectos que fuese posible hacerlo [22], medidas que implican un alto gasto público. Otras medidas físicas de menor costo están representadas por el tratamiento de la superficie del pavimento, las barreras acústicas en edificios y carreteras, la siembra de árboles y arbustos, el uso de vidrio acústico [23].

Sin embargo, y cuando el costo de las medidas físicas es elevado se puede recurrir a la gestión de tráfico para la reducción de los niveles de ruido vehicular basadas en medidas tales como: límites máximos de presión sonora en función de la categoría de la zona y los volúmenes vehiculares por hora registrados en los corredores viales [24], redistribución del tránsito vehicular, desarrollo de mayores áreas de parqueo, reducción de velocidad, incremento de la distancia entre las fuentes emisoras de ruido y los edificios y la denominada *eco-movilidad*, la cual consiste en el uso de modos de transporte menos contaminantes como la bicicleta [25].

Otras medidas aplicables consisten en el tratamiento del problema desde una perspectiva de transporte sostenible, territorio y urbanismo, para lo cual puede considerarse la construcción de ciclorutas para el fomento del uso de la bicicleta; planeación del desarrollo del transporte público en áreas urbanas; reducción de velocidad de los vehículos en las calles locales dentro de áreas residenciales; posibilidad de calmar el tráfico en el centro de la ciudad; preparación de un plan de ruido local en edificaciones y la creación de zonas ambientales protegidas de ruido [26]. Todas las anteriores medidas pueden arrojar mejores resultados cuando se complementan con el uso de herramientas de tecnológicas para el seguimiento, planeación y administración, por ejemplo, por medio de la elaboración de mapas de ruido mediante software de modelación [27,28], el uso de modelos de predicción de ruido, y la vinculación de entidades públicas y municipales [29].

Considerando lo anteriormente expuesto y atendiendo a los resultados del estudio y hallazgos hechos, se identifican las diferentes medidas aplicables para lo cual se tienen en cuenta cuatro criterios:

1. Identificación de responsables y autoridades locales competentes.
2. Normatividad y niveles de ruido vehicular.

3. Medio físico y características de vías urbanas.
4. Características del tráfico vehicular, de ésta manera se plantean medidas aplicables en el corto, mediano y largo plazo.

Cada uno de los escenarios contempla estrategias y acciones que pueden ayudar a la reducción de los niveles del ruido, y que en conjunto forman un plan estratégico piloto para el control del ruido del tráfico rodado. En las tablas 6 - 8 se presentan dichas acciones.

Estrategias	Acciones
Participación conjunta de entidades gubernamentales y autoridades locales	Alcaldía Mayor de la ciudad de Tunja.
	Secretaría de Salud; protección de la integridad física y psicológica de los ciudadanos.
	Corporación Autónoma Regional de Boyacá; control y preservación de los recursos naturales de la región.
	Secretaría de Tránsito; administración del tránsito. Ministerio de Transporte
Planificación urbana integral	Secretaría de Planeación; uso de suelo y sus efectos en el desarrollo del medio físico urbano.
	Ajuste de los nuevos y futuros proyectos urbanísticos a las actuales políticas de usos y aprovechamiento del suelo y preservación del recurso aire y agua
Planeación, medio físico e infraestructura de los corredores viales (Decreto 0798 de 2010 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010))	Consolidación de una base de datos de libre consulta entre las entidades del estado, las entidades autónomas, los centros de investigación y las universidades.
	Registro de datos en periodos de medición y conteo de entre una y dos horas preferiblemente en horas pico y horas valle consecutivas y distribuidos a lo largo del día entre las 7:00 a.m. y las 9:00 p.m.
Elaboración obligatoria de mapas de ruido de tráfico por sectores	
Gestión de tráfico vehicular	Reducción de densidad de tráfico en las vías del centro de la ciudad; reducción esperada de entre 2,0 dBA y 6,0 dBA (Bendtsen et ál., 2005) [30].
	Asignación de vías periféricas a vehículos de transporte de carga y transporte público intermunicipal
	Reducción de velocidad en corredores viales; a límites de 30, 40 y 60 km/h en vías con alto flujo, reducción esperada de 1,4 dBA a 3,6 dBA (Andersen, 2003; Ellebjerg, 2008; Ellebjerg 2007) [31–33]
	Gestión de operación del transporte público; intervalo de 10 a 15 min
	Planeación del transporte público colectivo urbano de pasajeros

Tabla 6: Estrategias aplicables en el corto plazo.



<b>Estrategias</b>	<b>Acciones</b>
Ajuste a la normatividad en el entorno local	La normatividad actual proporciona criterios aplicables únicamente a las mediciones y niveles máximos permisibles para emisiones de ruido ambiental. Se plantea el ajuste de la normatividad vigente a nivel nacional mediante la formulación de criterios y niveles admisibles aplicables a ruido vehicular en el ámbito local para la ciudad de Tunja.
Elaboración de mapa de ruido de tráfico red vial.	Se plantea la elaboración del mapa de ruido de tráfico para la red vial de la ciudad, especificando la localización y distribución de las vías consideradas de carácter conflictivo y aquellas que presenten cierto grado de vulnerabilidad al volverse corredores viales de conflicto y altos niveles de ruido. Esta medida debe considerarse como prioritaria con el objeto de contar con mejores argumentos y herramientas para la planificación de estrategias de control y su eventual implementación.
Tratamiento urbanístico	VARIABLES CUANTIFICADAS Y EVALUADAS COMO LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y GEOMÉTRICAS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE ALGUNAS DE LAS VÍAS (AVENIDA ORIENTAL Y AVENIDA NORTE); EN LAS QUE SE ENCUENTRAN FLUJOS VEHICULARES IMPORTANTES, PROPORCIONAN UNA BASE FIRME PARA LA FORMULACIÓN DE MEDIDAS A MEDIANO PLAZO COMO LO SON LAS BARRERAS DE ÁRBOLES Y LA DISPOSICIÓN DE VÍAS PARA BICICLETAS A LO LARGO DE LAS VÍAS MÁS AMPLIAS.

Tabla 7: Estrategias propuestas para el mediano plazo.

<b>Estrategias</b>	<b>Acciones</b>
Incremento de porcentaje de uso de modos de transporte sostenible	Disposición de las infraestructuras continuas necesarias para el desarrollo de modos de transporte alternativos; peatonal, bicicleta, tranvía [34], en el marco de las nuevas políticas de desarrollo urbano sostenible establecidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ley 1083 de 2006), sin que por ello se vea afectado el crecimiento de la ciudad y garantizando además la protección de la salud pública y la preservación del medio ambiente urbano.
Conformación de organismo para el seguimiento, control e intervención del ruido del transporte	A partir de series históricas, mapas de ruido, normatividad, planificación urbana e instituciones involucradas, puede pensarse en seguir el ejemplo de otros países como los de la Unión Europea y Norteamérica en donde se han generado las políticas necesarias para la creación de entidades autónomas encargadas de atender el problema del ruido.  Para el caso de la ciudad de Tunja, y con proyección a nivel nacional, la integración de los sectores involucrados; gubernamental, salud, planeación territorial, transporte y universidades, puede contribuir a la conformación de un organismo autónomo que en el futuro se encargue de desarrollar los procesos de seguimiento y diseño de estrategias y mecanismos orientados hacia la mitigación y control de los efectos del ruido producido por el tráfico proyectándose a otros medios y modos de transporte automotor; aéreo, ferroviario, terrestre de carga, intermunicipal, en los que también se perciban problemas de contaminación acústica.

Tabla 8: Estrategias proyectadas a largo plazo.

## 5. Conclusiones

Se determina que la variación del nivel de presión sonora durante los periodos de medición presentaba un comportamiento estable, conservándose durante dichos periodos sin mayores fluctuaciones, lo cual, al considerar la distribución de los horarios de medición permite sugerir que el ruido vehicular se conservaba también a lo largo del día presentado pequeñas variaciones. El análisis del comportamiento de las variables indica que los altos niveles de presión sonora responden a los volúmenes de tipos específicos de vehículos como los de transporte público y los vehículos de carga, lo cual además se puede verificar al observar los resultados del análisis de incidencia, las correlaciones de Pearson y el análisis de varianza Anova entre el ruido vehicular y los volúmenes de tráfico.

El análisis de incidencia de la velocidad espacial en la generación de ruido vehicular mediante regresión lineal, permite señalar que la variación de la velocidad media espacial desarrollada en los corredores viales estudiados puede explicar la variación de los niveles de presión sonora, para lo cual el aumento en la velocidad ocasiona un incremento en el ruido vehicular, debido principalmente a la aceleración y deceleración de los vehículos que conlleva a la generación de niveles de ruido más altos por el aumento de la potencia en el motor. De otra parte, las correlaciones Pearson Tau b de Kendall y Rho de Spearman permiten afirmar que el intervalo de paso de las rutas de transporte público guarda una relación directa con los niveles de ruido vehicular encontrados, con lo que se determina que en la medida que los vehículos de transporte estén sujetos a intervalos de paso más pequeños, mayores son los niveles de presión sonora generados en los corredores viales de la ciudad.

A partir de las velocidades medias encontradas en la caracterización de los flujos vehiculares, se formulan valores de reducción de la velocidad desarrollada por los vehículos estableciendo límites de 30, 40 y 60 km/h en vías con altos flujos vehiculares proyectando una reducción en los niveles de ruido vehicular entre 1,4 dBA y 3,6 dBA. Basándose en el análisis de los intervalos y frecuencias de paso de los vehículos tipo bus pertenecientes a las rutas de transporte que operan en la ciudad, se plantea la fijación de intervalos de paso entre 10 y 15 minutos con el objetivo de inducir una mejor operación del transporte público en la ciudad y el fomento de su uso por parte de los usuarios.

Se formula la elaboración de mapas de ruido por sectores para la ciudad en el corto plazo con la proyección

en el mediano plazo de consolidar dicha información en el mapa de ruido de tráfico vehicular para la ciudad de Tunja, planteando además una metodología detallada para la realización de las mediciones y registro de información en campo. Otras medidas que se plantean son; la planificación urbana sostenible en el corto, mediano y largo plazo enfocada principalmente al uso del suelo y la formulación de proyectos de infraestructura vial y urbanísticos, el ajuste de la normatividad nacional vigente y la generación de una norma local, y finalmente la conformación de un organismo autónomo integral encargado del ejercicio de actividades de planificación, seguimiento y control del ruido producido por el tráfico vehicular.

## Referencias

- [1] PMUS IDAE. Guía práctica para la elaboración e implantación de planes de movilidad urbana sostenible. *Madrid, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio*, 2006.
- [2] Resolución 0627 del 7 de abril de 2006: por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental. Technical report, República de Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá D.C., Colombia, p. 1-11, p. 12-17, p. 20. 30 p., 2006.
- [3] Instrucción para el diseño de la vía pública. ficha 10.2: acondicionamientos frente a ruido. Technical report, Ayuntamiento de Madrid, Madrid, España, 2002.
- [4] Sustainable mobility initiatives for local environment. guidelines for road traffic noise abatement. Technical report, The SMILE consortium, 2003.
- [5] Extech Instruments Corporation. *Manual de usuario extech instruments sonómetro modelo HD 600. Medidor digital de nivel de sonido con grabadora integral de datos HD600 V1.2*, 2007.
- [6] International standard iec 61672-1. electroacoustics, sound level meters. part 1: specifications. switzerland. Technical report, International Electrotechnical Commission IEC., 2002.
- [7] International standard iec 61672-2. electroacoustics, sound level meters. part 2: pattern evaluation tests. switzerland. Technical report, International Electrotechnical Commission IEC., 2003.
- [8] Documento soporte norma de ruido ambiental. convenio de asociación no. 038/04 (numeración mavdt) - 112/04 (numeración ideam). *Ideam, Subdirección De Estudios Ambientales*, page 299, Bogotá D.C., Colombia, 2006.
- [9] WM To, Rodney CW Ip, Gabriel CK Lam, and Chris TH Yau. A multiple regression model for urban traffic noise in hong kong. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(2):551-556, 2002.
- [10] I Alimohammadi, P Nassiri, and M Behzad MR Hosseini. Reliability analysis of traffic noise estimates in highways of tehran by monte carlo simulation method. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2(4):229-236, 2005.
- [11] Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto and Maysa Daniela Moreno Mardones. Noise mapping of densely populated neighborhoods—example of copacabana, rio de

- janeiro—brazil. *Environmental monitoring and assessment*, 155(1-4):309–318, 2009.
- [12] José Pacheco, Juan F Franco, and Eduardo Behrentz. Caracterización de los niveles de contaminación auditiva en bogotá: Estudio piloto. *Revista de Ingeniería*, (30):72–80, 2009.
- [13] P Mitchell. Speed and road traffic noise, the role that lower speeds could play in cutting noise from traffic. *Chatham, Kent, UK: A report commissioned by the UK Noise Association*, 2009.
- [14] Frederico Rodrigues, Cristiano Resende, Carlos David Nassi, and Suzana Kahn. Traffic engineering indicators analysis as explanatory variables of traffic noise. In *Inter. noise*, pages 15–16, 2010.
- [15] Bruno Sérgio Portela and Paulo Henrique Trombetta Zannin. Analysis of factors that influence noise levels inside urban buses. *J Sci Ind Res*, 69:684–7, 2010.
- [16] Guidelines for road traffic noise abatement. *Sustainable Mobility Initiatives for Local Environment*, pages 19–30, 23-24 October, Berlin, Germany, 2003.
- [17] Montgomery Douglas and Runger George. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. *Editorial Mc Graw-Hill*, 1996.
- [18] Richard Arnold Cera Alonso Johnson, IrwinFreund Miller, John E Gonzalez Pozo, et al. *Probabilidad y estadística para ingenieros de Miller y Freund*. Prentice-Hall Hispanoamericana., 1997.
- [19] Ronald E. Walpole, Raymond H. Myers, and Sharon L. Myers. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Pearson Educación, 1999.
- [20] J. R. Quintero González. El ruido del tráfico vehicular y sus efectos en el entorno urbano y la salud humana. *Revista PUENTE Científica*, 7(1):93–99, 2013.
- [21] A. Donoso. Propuestas y medidas contra el ruido. planes locales de acción contra el ruido. In *10 ° Congreso Nacional de Medio Ambiente, CONAMA 10*, page 3, Jueves 25 de Noviembre de 2010, Chile.
- [22] A draft comprehensive plan to tackle road traffic noise in hong kong. *Hong Kong Environmental Protection Department*, pages 4–6, 2006.
- [23] Noise action plan. project no. c2058.42. arup consulting engineers. *Limerick City Council*, pages 24–28, October Limerick, Ireland, 2006.
- [24] Ecoaccess. Guideline noise: planning for noise control. *Queensland Parks and Wildlife Service, Environmental Protection Agency, Queensland Government*, pages 3–6, Brisbane, Australian, 2004.
- [25] B Lehming. Noise reduction plan for berlin-action plan, senatsverwaltung für gesundheit, umwelt und verbraucherschutz. *Abt. III Umweltpolitik, Referat Immissionschutz. Berlin*, 2008.
- [26] N Torslov. Traffic in copenhagen 2009. *Technical and Environmental Administration (Ed.)*. City of Copenhagen, pages 10–13, 2010.
- [27] Gobierno de Canarias. Plan de acción: mapas estratégicos de ruido de la comunidad autónoma de canarias. *Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial*, page 5, 2007.
- [28] Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de La Ingeniería. Instituto de Acústica. Elaboración de mapa de ruido de la ciudad de valdivia mediante software de modelación utilizando métodos de simplificación. Technical report, Contrato conexo a contrato No. 01-059/09, Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA., Valdivia, Chile, 2010.
- [29] Pennsylvania Department Of Transportation. Project level highway traffic noise handbook. Technical report, Publication No. 24, Harrisburg, Pennsylvania, United States Of America, 2007.
- [30] Hans Bendtsen, Jürgen Haberl, Johan Litzka, Ernst Pucher, Ulf Sandberg, and Greg Watts. *Traffic management and noise reducing pavements: recommendations on additional noise reducing measures*. Number 137. 2004.
- [31] Bent Andersen. *Støjuddsendelse fra biler på vejnettet*. Danmarks Transportforskning, 2003.
- [32] Lars Ellebjerg. The role of traffic flow and traffic calming measures. page 4.
- [33] Lars Ellebjerg. Basic traffic - noise relations. *Sixth framework programme priority 6, Sustainable Development, Global Change Ecosystems, Integrated project – contract No. 516288. Noise Reduction in Urban Areas from Traffic and Driver Management. WP H.1 Methods for Noise Control by Traffic Management, SILENCE*, page 11, 2008.
- [34] Julián Rodrigo Quintero González and Laura Estefanía Quintero González. El transporte sostenible y su papel en el desarrollo del medio ambiente urbano. *Revista Ingeniería y Región*, 14(2):87–97, 2016.