

# Simulación y control del ruido ambiental generado por un Frente de construcción del Metro. Análisis de un caso real

## Modeling and control of environmental noise generated by a subway construction shaft. Real Case Analysis

Rastelli, Victoria H. <sup>2\*</sup>, Rastelli, Victor <sup>1</sup>, Montbrun, Nila <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Simón Bolívar, Departamento de Mecánica. Caracas, Venezuela.

<sup>2</sup> Gerencia de Proyectos de Control de Ruido RPRM & ASOCIADOS C.A.

\*vhrastelli.rprmasociados@gmail.com

### Resumen

*La contaminación sónica es uno de los problemas ambientales más graves de las comunidades aledañas a los Frentes de construcción del sistema Metro en la Gran Caracas, ya que las Obras se encuentran cerca de urbanizaciones residenciales y el ritmo de la construcción incluye horario nocturno y en casos especiales, fines de semana. Es alta la complejidad al analizar el ruido ambiental en Obras donde la mayoría de las fuentes de ruido son móviles y la cantidad, disposición y tipo de equipos, varía en las fases de construcción. En este artículo se analiza un Frente de Obra del metro de los Teques que generaba quejas en la comunidad. En una primera instancia se modeló a través de curvas isosónicas el comportamiento en el año 2009 (fase de excavación) y el comportamiento futuro (año 2011, fase de apoyo a tuneladoras). Se generaron recomendaciones para el control de ruido de las fuentes principales, que fueron implantadas por el personal técnico y evaluadas en el año 2011, realizando nuevamente mediciones de ruido ambiental. Se cuantificó la efectividad de las medidas de control de ruido y la precisión del modelo de predicción. A finales del 2013, habían disminuido las quejas de parte de la comunidad.*

**Palabras clave:** control, ruido, construcción, modelado, isosónicas.

### Abstract

*Sonic pollution is one of the environmental problems that greatly affect local communities close to subway system construction shafts in the greater Caracas, because essentially these works are usually near residential developments (for future users) and, on the other hand, the schedule of construction includes night and in special cases, weekends shifts. Additionally it is complex to analyze, model and control this kind of environmental noise behavior, where the majority of noise sources are mobile and the number, disposition and type of equipment varies in time (depending on the stage of construction). This article examines the work done across a construction shaft of Metro Los Teques, where it was first modeled by tracing isosonic curves, for the behavior of the moment, (year 2009, first stage: excavation of shaft and mine tunnel phase) and it was predicted the future behavior (for the year 2011, second phase: support to underground tunneling machines). As a result of this work, were proposed several noise control actions that were installed by environment and production subway personnel. In 2011, new environmental noise lectures were made, to evaluate the efficiency of these noise control actions taken and the accuracy of the prediction model.*

**Palabras clave:** control, noise, construction, modelling, isosonics.

### 1 Introducción

La ingeniería desempeña un rol fundamental en la disminución de los niveles de ruido ambiental, para que entre otras cosas, se logre la convivencia armónica entre ambientes de trabajo y de vida cotidiana. El ruido es un problema

serio, ya que existe una relación directa entre exposición al ruido y la interferencia en los patrones de sueño de las personas (Gómez 2011).

En la construcción, el tema del ruido no es sólo ambiental (residentes cercanos), sino que los altos niveles de ruido en las Obras, afectan también a los trabajadores. El 21.9% de los trabajadores de la construcción en España, por

ejemplo, estaban recientemente expuesto a niveles de ruido entre elevados y muy elevados (Gómez 2011).

Debido al rápido crecimiento urbano de la Gran Caracas y a las necesidades de transporte de la población, actualmente se desarrollan en la ciudad ampliaciones a los sistemas actuales de metro, tal es el caso del Metro de Los Teques. Este sistema de transporte sin duda aumentará en el futuro la calidad de vida de los pobladores de San Antonio y Los Teques, pero actualmente genera quejas en las comunidades vecinas a los Frentes de Obra (futuras estaciones del Metro o fosos de servicio), especialmente por los altos niveles de ruido producidos por la construcción.

Innegablemente en las ciudades modernas, el tema de la movilidad, en respuesta al crecimiento demográfico, se asocia directamente al ruido y a la contaminación sonora entre otros aspectos (Aguilar, y col., 2013). Estos autores proponen ciertas medidas para reducir los impactos ambientales en el proceso de construcción, tales como: difusión del proyecto en comunidades previo inicio, planes para evitar congestión vehicular durante la construcción, colocación de filtros de material particulado, seguimiento en la seguridad de trabajadores, análisis permanente del ruido para mitigar su impacto y promoción de tecnologías limpias, reciclaje y cuidado del ambiente.

Los Frentes de construcción usualmente se ubican cerca de las urbanizaciones, centros comerciales o industriales (futuros usuarios), poseen numerosas fuentes de ruido (maquinaria y equipos), muchas de las cuales no son fijas sino móviles y tienen horarios de trabajo que involucran algunas veces noches y fines de semana.

Estos patrones de ruido ambiental intermitente o cambiante según la hora del día o el día de la semana, tienen peores incidencias o alteraciones en los patrones del sueño de las personas (Munzert 2007).

Además cada Frente de Obra es dinámico, la condición de ruido que presentan en determinadas fases de trabajo cambia, pues los procesos son diferentes, ingresan nuevos equipos o algunos equipos varían su régimen de operación (por ejemplo los ventiladores axiales para el interior del túnel, aumentan su velocidad a medida que avanza el mismo y por ende aumentan sus niveles de ruido ambiental).

Por estas razones, el análisis, la simulación y el control del ruido en los Frentes de construcción del metro, es un tema técnicamente complejo de abordar y representa un reto interesante y necesario.

El reto de controlar el ruido de una construcción en progreso, es muy grande, ya que por un lado siempre habrá ruido inherente a la construcción y por el otro, se deben evaluar costos razonables y mecanismos eficientes para su control (Thalheimer 2000).

Este autor recomienda evaluar el impacto del ruido ambiental en los Frentes de Obra, establecer límites máximos de ruido, definir restricciones en determinados equipos, establecer planes de mitigación con ingenieros acústicos, e igualmente generar modelos predictivos de ruido y hacer seguimiento en el corto y mediano plazo a este tipo de pro-

yectos. Los métodos de control de ruido que propone son: horario restringido para ciertas fuentes de ruido, colocación de silenciadores, implantación de planes de lubricación y mantenimiento (el ruido se puede originar por fallas mecánicas), reducción de potencia en algunos equipos si es posible (a mayor potencia, mayor nivel de ruido), construcción de barreras y confinamientos acústicos, tratamiento y sustitución de ventanas aislantes y comunicación constante con la comunidad.

El control del ruido en la construcción es tan importante, que es necesario que los gerentes de Obra y promotores de proyectos demuestren con acciones concretas, que este tema será tomado con prioridad en todas las etapas del proyecto (Thalheimer 2000).

El caso de trabajo para este artículo es un Frente de Obra ubicado al borde de la Carretera Panamericana, próximo a la ciudad de Los Teques, Estado Miranda, con dos urbanizaciones exclusivamente residenciales aledañas (casas y edificios), presentando actividad diurna y nocturna en días laborables.

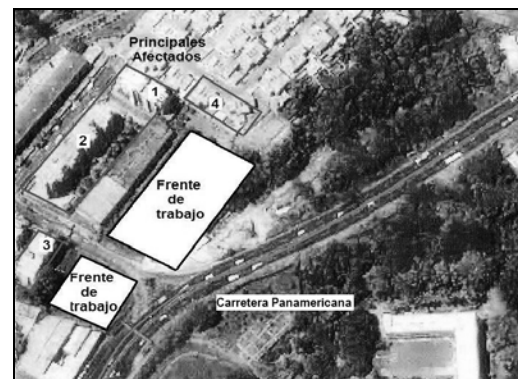


Fig. 1. Fotografía satelital de la ubicación del Frente de Obra y sus principales afectados.

El objetivo del proyecto fue en una primera etapa, modelar la condición de ruido ambiental de la fase de trabajo del Frente en ese momento (Fase I, año 2009, construcción del foso y túnel minero) a través de planos de curvas isosónicas (diferentes escenarios) y, con el tipo, cantidad y disposición futura de los equipos para la fase II (logística y apoyo de Tuneladoras), modelar la condición de ruido ambiental futura (año 2011), también a través de la generación de curvas isosónicas.

La segunda etapa del proyecto, consistía en, calcular y generar recomendaciones de control de ruido (técnicas e institucionales) para implantarlas en el corto y mediano plazo.

Una vez implantadas las recomendaciones de control de ruido, se visitó el Frente de Obra en la Fase II (año 2011, logística y apoyo a las Tuneladoras) y se realizaron nuevas mediciones de ruido ambiental en las urbanizaciones afectadas. Todo esto con el propósito de verificar la efectividad de las acciones de control de ruido propuestas con anterioridad y medir la precisión de los cálculos de niveles de ruido

estimados en el año 2009.

## 2 Metodología empleada

Durante el período Julio – Septiembre de 2009, se realizaron dos tipos de mediciones de ruido en el Frente de Obra seleccionado, en las azoteas de los edificios más cercanos (Niveles  $L_{eq}$ ,  $L_{10}$  y niveles lineales en Banda Octava) y mediciones de ruido ocupacionales, a una distancia determinada de cada máquina y equipo que trabajaba en el Frente de Obra (Niveles  $L_{eq}$  y niveles lineales en Banda Octava).

Los niveles de ruido  $L_{eq}$  (nivel continuo equivalente) y  $L_{10}$  (nivel estadístico o percentil 10), son los principales parámetros de ruido ambiental, siendo el primero el nivel medio energético de ruido para un período de tiempo y el segundo el nivel de ruido excedido durante el 10% del tiempo de medición. Los niveles lineales en Banda Octava representan la descomposición del sonido en frecuencias en las ocho principales Bandas (desde 63 Hz hasta 8 kHz).

Las mediciones de ruido ambiental se realizaron en horarios diurno y nocturno (antes y después de las 9:30 p.m.) e inclusive se cuantificó el ruido de fondo (un sábado, sin actividades del Frente de Obra). Las mediciones de ruido ocupacional se realizaron en horario diurno, midiendo en campo libre cada equipo que trabajaba en el Frente.

Durante el proyecto, la medición de ruido en campo libre se realizó según lo dictamina la Norma COVENIN 1.671 - 1988, Fuentes de ruido estacionarias, determinación del ruido (sección 6, procedimiento). La teoría muestra que las lecturas en campo libre, se toman a una distancia entre 1 – 1,5 veces el tamaño en planta del equipo que se desea medir, siempre que sea posible. Esto se hace con el fin de obtener lecturas de ruido válidas de cada equipo, que puedan ser posteriormente extrapoladas para las curvas isosónicas, tal como se muestra a continuación:

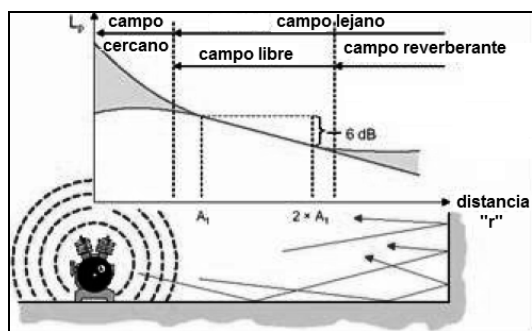


Fig. 2. Campo cercano, campo libre y lejano.

Bajo estas condiciones se recrearon varios escenarios de ruido ambiental de la Obra (año 2009) a través de curvas isosónicas.



Fig. 3. Distribución de equipos en el Frente. Fase I: excavación y túnel minero.

Para recrear el caso futuro, se solicitó el plano de la disposición de equipos que tendría el Frente en su Fase II y los equipos que no se encontraban en ese momento en el Frente de Obra, se midieron igualmente en campo libre, en otro Frente de Obra del Metro de Los Teques. A partir de esta data, se generaron los planos de curvas isosónicas de la condición futura del Frente en varios escenarios (entrada de camiones, descarga del material excavado, etc).

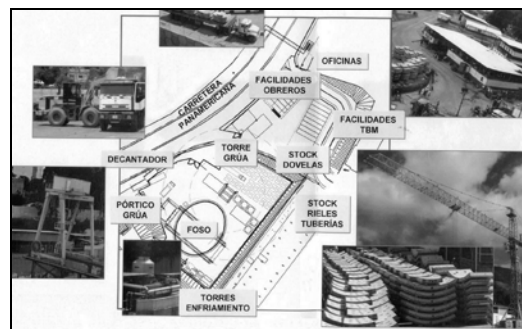


Fig. 4. Distribución de equipos en el Frente. Fase II: logística y apoyo a tuneladoras.

Entre los planos de curvas isosónicas que se construyeron, estaban el plano de la situación inicial (2009) y de la situación futura (2011), en varios escenarios que comprendían acciones de control de ruido. Entre estas acciones se encontraba la construcción de barreras de sonido y el cambio de posición de los equipos más ruidosos cerca del talud natural que separa el Frente de Obra de los edificios (que actuaría como una barrera parcial natural).

La segunda etapa del estudio se realizó durante Marzo de 2011 (Fase II de la construcción), en la cual se tomaron mediciones de ruido ambiental en los mismos puntos medidos durante el año 2009. También se evaluaron los cambios implantados en el Frente de Obra con fines de control de ruido (en relación a las recomendaciones) y los cambios entre la situación del Frente proyectada en el año 2009 y la situación real (incorporación de equipos no proyectado o cambios en condiciones de operación).

### 3 Resultados obtenidos

Durante las mediciones de ruido ocupacionales realizadas en los equipos operativos del Frente en la fase I de la construcción, se identificaron las principales fuentes de ruido y frecuencias críticas, indicando su distancia de medición en campo libre, las cuales se listan en la Tabla 1:

Tabla 1. Lecturas Fase I Campo Libre: 07/2009. Fuente: Rastelli V. y Rastelli Montbrun V. H. 2009.

	Ventilador Swedvent (25 m)	Bomba de concreto Putzmeister BK40 (4 m)	Compresor Sullair 1050 (5 m)	Generador GEP 150 (4 m)
Leq (dBA)	84,0	80,9	77,6	77,0
Frecuencias en Hz, lecturas lineales en banda octava dB				
63	79,1	86,5	96,2	82,0
125	76,7	77,6	82,9	82,1
250	82,3	74,0	80,1	78,1
500	89,6	74,7	73,3	74,3
1000	78,8	75,2	73,3	72,0
2000	71,7	73,5	66,0	70,8
4000	62,8	69,2	60,7	63,0
8000	64,9	65,9	56,1	54,7

Como se observa, las principales fuentes de ruido presentaban como frecuencias críticas las frecuencias bajas (entre 63 Hz y 500 Hz). Se identificaron otras fuentes de ruido importantes como la maquinaria pesada (los timbres de retroceso en alta frecuencia) y la grúa telescópica con carga.

Las mediciones de ruido en equipos no variaría por horario (misma condición de operación), sin embargo las mediciones de ruido ambientales de los tres edificios más cercanos, tuvieron que realizarse en ambos horarios (diurno y nocturno), para comparar el ruido del Frente, con los límites establecidos por las normas (Decreto 2.217 – 1992, Normas sobre el Control de la contaminación generada por ruido). En estas mediciones, se observó que el ruido de fondo (carretera panamericana), contribuye notablemente al ruido total.

Tabla 2. Lecturas Ambientales diurnas Fase I: 07/2009. Fuente: Rastelli V. y Rastelli Montbrun V. H. 2009

	Azotea Edificio Altamira 3	Azotea Edificio Altamira 1	Ruido de fondo (Altamira 3)
Leq (dBA)	70,7	66,4	68,4
Frecuencias en Hz, lecturas lineales en banda octava dB			
63	77,1	69,9	70,4
125	72,6	68,1	71,1
250	68,4	62,5	64,1

500	64,9	60,4	68,6
1000	63,5	61,2	63,9
2000	60,3	56,7	61,6
4000	55,2	50,2	56,8
8000	43,4	41,6	43,5

Tabla 3. Lecturas Ambientales nocturnas Fase I: 07/2009. Fuente: Rastelli V. y Rastelli Montbrun V. H. 2009.

	Azotea Edificio Altamira 3	Azotea Edificio Altamira 1
Leq (dBA)	66,7	65,0
Frecuencias en Hz, lecturas lineales en banda octava dB		
63	75,0	70,3
125	69,1	73,3
250	66,1	68,4
500	63,4	66,0
1000	62,0	62,2
2000	61,1	56,3
4000	52,9	51,2
8000	46,3	41,8

Para el Edificio crítico, al restar los niveles exponenciales de ruido  $L_{total} - L_{fondo}$  diurnos, se obtenía el ruido de la fuente (únicamente el Frente de Obra). El cálculo del ruido de la fuente diurno, se muestra a continuación:

$$L_{fuente FI} = 10 \cdot \text{Log} \left( 10^{\frac{70,7}{10}} - 10^{\frac{68,4}{10}} \right) = 66,8 \text{ dBA} \quad (1)$$

La zona de sensibilidad urbana definida por el artículo 5 del Decreto 2.217, que mejor se adapta al lugar es una zona III (sector residencial – comercial cerca de vías de alto tráfico). Según estos límites, el nivel de ruido de la fuente diurno, sobrepasaba 1,8 decibeles el límite establecido (65 dBA).

Sin embargo, teniendo este valor, se pueden relacionar las intensidades sonoras y obtener los porcentajes de contribución diurna del Frente de Obra en relación al ruido total diurno y la contribución del ruido de fondo al ruido total diurno, esto se aprecia en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{L_{fuente FI}}{L_{total}} = \frac{I_o \cdot 10^{\frac{66,8}{10}}}{I_o \cdot 10^{\frac{70,7}{10}}} = 0,41 \quad (2)$$

$$\frac{L_{fondo}}{L_{total}} = \frac{I_o \cdot 10^{\frac{68,4}{10}}}{I_o \cdot 10^{\frac{70,7}{10}}} = 0,59 \quad (3)$$

Esto significa que el ruido de fondo diurno representa en esta fase 59% del ruido total, con un 41% de contribución del ruido del Frente de la Obra en esta Fase.

Durante la noche, la velocidad de los automóviles y tráfico pesado en la Carretera Panamericana, hizo que el ruido total medido en el Frente, fuera de  $L_{eq} = 67,1$  dBA, nivel menor que el nivel de ruido de fondo estimado el día sábado (68,4 dBA). Esto puede parecer contradictorio, sin embargo resalta la alta contribución y fluctuación del ruido del tráfico, al ruido total ambiental.

En cuanto a los planos de curvas isosónicas, la primera corrida (condición de trabajo normal) mostró buena precisión en cuanto a los niveles de ruido diurnos predichos para los edificios en esta fase ( $L_{eq}$  70 dBA en el Edificio más afectado y  $L_{eq}$  67 dBA en los demás Edificios cercanos) y los niveles medidos en estos edificios (70, 7 y 66,4 dBA, Tabla 2), esto se aprecia en la siguiente figura.

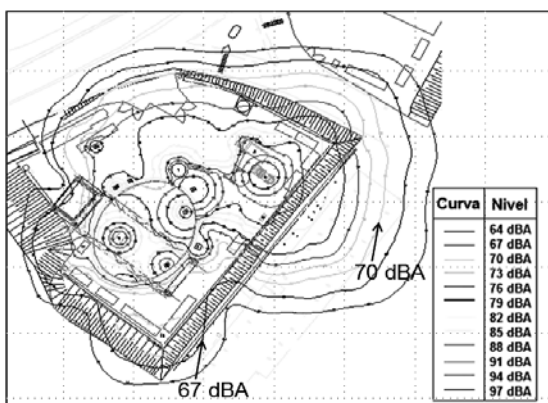


Fig. 5. Curvas isosónicas de la condición Fase I del Frente, niveles de ruido en los Edif. afectados.

Para estimar la condición de ruido futura del Frente (Fase II), las curvas isosónicas incorporaron un segundo ventilador axial (funcionarían dos simultáneamente y a mayores revoluciones), dos torres de enfriamiento y una cámara hiperbárica con sus compresores. Estos equipos representarían el mayor impacto futuro. Sus niveles de ruido se midieron en otro Frente de Obra y se muestran a continuación:

Tabla 4. Lecturas Fase II Campo Libre: 07/2009. Fuente: Rastelli V. y Rastelli Montbrun V. H. 2009

	2 Vent. Swedvent (25 m)	Equipo Hiperbárico Atlas Copco (4 m)	Torres enfriam. Korper (5 m)
$L_{eq}$ (dBA)	87,0	84,8	80,9
Frecuencias en Hz, lecturas lineales en dB			
63	82,1	76,1	77,1
125	79,7	86,6	77,3
250	85,3	78,5	78,1
500	92,6	77,0	78,0
1000	81,8	73,8	75,3
2000	74,7	77,1	73,2
4000	65,8	80,5	73,3
8000	67,9	79,4	70,1

Como se aprecia, estos nuevos equipos de la Fase II, también presentan como frecuencias críticas las bajas.

Las curvas isosónicas de la Fase II, mostraron un importante incremento de los niveles de ruido dentro del Frente de Obra (ampliándose las zonas de 97 y 94 dBA) y también fuera del mismo, para los Edificios residenciales (aumentando sus niveles de 70 – 67 dBA en la Fase I a 73 dBA en la Fase II). Esto se aprecia en la siguiente figura:

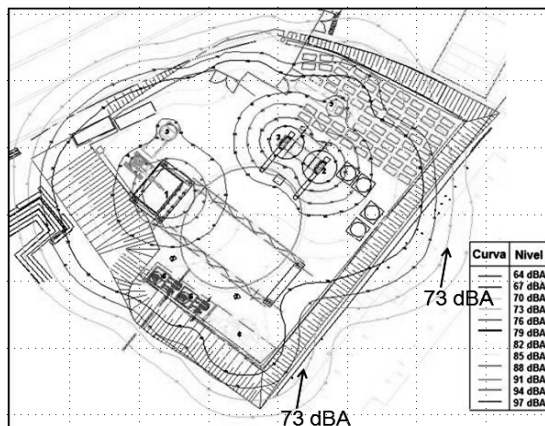


Fig. 6. Curvas isosónicas de la condición Fase II del Frente, niveles de ruido en los Edif. afectados.

Entre las acciones de control de ruido recomendadas e implantadas en el Frente de Obra se encontraban las siguientes:

- Colocación de equipos ruidosos lo más cercano al talud que separa el Frente de los Edificios (barrera natural). Al colocar en esta posición los equipos ruidosos, se dificulta el camino que realiza el ruido desde la fuente hasta el afectado y existe una pequeña reducción de ruido.
- Diseño de una barrera acústica adicional para la esquina en la cual se encontrarían las torres de enfriamiento y el equipo hiperbárico (esquina central inferior, Fig. 6). Esta barrera se diseñó con las dimensiones y el material (relación peso/superficie) mínimo que pudiese asegurar una buena atenuación de ruido. La barrera se diseñó geométricamente según la ecuación de Maekawa para cada frecuencia:

$$NR = 20 \cdot \text{Log} \left( \frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot N}}{\tanh(\sqrt{2 \cdot \pi \cdot N})} \right) + 5 \text{dB} \tag{4}$$

$$N = \left( \frac{f}{565} \right) (A + B - d) \tag{5}$$

Siendo “A+B” la distancia más corta entre emisor y receptor alrededor de la barrera y “d” la distancia original entre emisor y receptor. Se explicó que en el caso del Frente, la reducción de la barrera sonora no sería tan eficiente, pues la mayoría de los equipos tiene como frecuencias críticas las bajas y medias (63 Hz, 125 Hz, 250 Hz y 500 Hz).

Las barreras acústicas son más eficientes bloqueando el sonido de alta frecuencia en relación al de baja frecuencia (salvo en la zona de coincidencia de cada curva), esto se evidencia en las curvas de la Ley de Masa, donde el coeficiente de "TL" o bloqueo del material, aumenta en magnitud a medida que aumenta la frecuencia, salvo en la zona de coincidencia o resonancia.

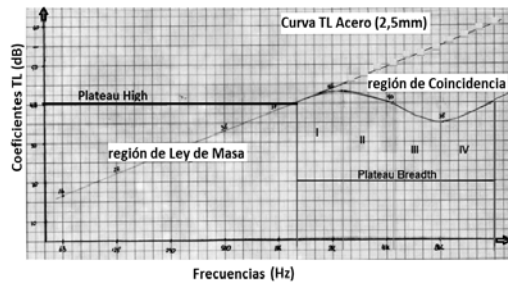


Fig. 7. Secciones de la curva TL del acero

- Techado de los equipos más ruidosos del Frente con lámina de zinc y si es posible, con un material más pesado como acero calibre 18 ó 20 para contrarrestar mejor el ruido de las frecuencias bajas. Este techado actúa también como una barrera, desviando el sonido lejos de los edificios.
- Colocación de dos silenciadores en tándem (modelo propio del fabricante) para cada ventilador axial Marca *Swedvent* operativo (2 ventiladores).
- Medidas institucionales de reducción de ruido: disminución de entrada de camiones en horario nocturno, charlas con el personal para disminuir el volumen en las conversaciones en horario nocturno y reducción del volumen en los teléfonos del Frente de Obra, especialmente en horario nocturno.

Durante el año 2011, después de instalar todas estas medidas de control de ruido en el Frente de Obra y ya en la Fase II de la construcción, se repitieron las mediciones de ruido ambiental en los Edificios afectados.

Considerando la precisión de las curvas isosónicas realizadas para la Fase I, estos niveles de ruido se compararon con las proyecciones de ruido realizadas para la Fase II, para cuantificar la eficiencia de las medidas de mitigación de ruido.

Se comprobó que la distribución de equipos de la fase II se correspondió con lo proyectado en las curvas isosónicas de esta fase. Sólo se consiguieron algunas fuentes de ruido que no fueron previstas en la simulación de esta fase durante el 2009, estas fuentes fueron las siguientes:

- Planta bicomponente: se encontraba relativamente lejos de la zona de Edificios, su nivel de ruido era de  $L_{eq} = 82,1$  dBA a 3 m de distancia.
- Ruido de purgas de compresores y pulmón hiperbárico: no representó una fuente de ruido continua sino impulsiva, su nivel de ruido era de  $L_{eq} = 96,1$  dBA a 3 m de distancia con una duración de 2 seg aproximadamente.

- Ruido de la descarga de cemento en silos: actividad que se realizaba 2 veces al día, con un nivel de ruido  $L_{eq} = 91,8$  dBA a 4 m de distancia.

Se verificó igualmente que las medidas de reducción de ruido que se habían tomado seguían efectivamente todas las pautas indicadas en el año 2009. Se habían cubierto efectivamente la mayoría de los equipos que hubieran generado los niveles de 73 dBA estimados por las curvas isosónicas, en los edificios residenciales. Tal como se aprecia en la siguiente figura:



Fig. 8. Fase II del Frente de Obra, acciones de control de ruido tomadas.

El objetivo era obtener niveles de ruido que no impactasen tanto en la calidad de vida de los vecinos durante esta etapa. Las lecturas de ruido de esta fase, realizadas en los Edificios residenciales, luego de la toma de acciones de control de ruido, se muestran a continuación:

Tabla 5. Lecturas ambientales Fase II Edif. crítico: 03/2011. Fuente: Rastelli V. y Rastelli Montbrun V. H. 2011

	Ruido total Diurno	Ruido fondo diurno	Ruido total Nocturno	Ruido fondo Nocturno
$L_{eq}$ (dBA)	68,1	65,9	68,5	65,9
Frecuencias en Hz, lecturas lineales en banda octava dB				
63	73,3	73,5	69,9	69,4
125	71,9	69,8	72,4	69,1
250	67,8	63,0	69,6	63,4
500	65,2	61,9	65,0	60,6
1000	62,3	60,2	63,3	58,9
2000	59,8	56,6	59,5	56,9
4000	54,9	47,4	57,6	55,1
8000	47,9	38,4	50,5	48,4

Con estas lecturas de ruido, se puede observar que, a pesar de la existencia de mayor cantidad de equipos (con altos niveles de ruido) en la Fase II en relación a la Fase I, con las medidas de control de ruido implantadas, se obtuvo en el Edificio crítico un nivel de ruido  $L_{eqfuente} = 64,1$  dBA (realizando la resta  $L_{total} - L_{fondo}$ ).

$$L_{fuente\ FII} = 10 \cdot \log \left( 10^{\frac{68,1}{10}} - 10^{\frac{65,9}{10}} \right) = 64,1 \text{ dBA} \quad (6)$$

Este nivel de ruido es 2,7 decibeles menor que el nivel de ruido de la fuente diurno en la Fase I (66,8 dBA). Esto significa que las medidas de control de ruido fueron sumamente eficientes, ya que esta reducción de ruido, representa para la Fase II tener el 53% del ruido original de la Fase I.

$$\frac{L_{\text{fuente 2011}}}{L_{\text{fuente 2009}}} = \frac{I_0 \cdot 10^{\frac{64,1}{10}}}{I_0 \cdot 10^{\frac{66,8}{10}}} = 0,53 \quad (7)$$

Para el año 2011, la contribución de ruido de la fuente en relación al ruido total era de 40%, por ende el ruido de fondo representa el 60% del ruido total diurno. Lo que se aprecia en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{L_{\text{fuente}}}{L_{\text{total}}} FII = \frac{I_0 \cdot 10^{\frac{64,1}{10}}}{I_0 \cdot 10^{\frac{68,1}{10}}} = 0,40 \quad (8)$$

$$\frac{L_{\text{fondo}}}{L_{\text{total}}} FII = \frac{I_0 \cdot 10^{\frac{65,9}{10}}}{I_0 \cdot 10^{\frac{68,1}{10}}} = 0,60 \quad (9)$$

A nivel global, comparando entonces la situación de ruido ambiental proyectada según las curvas isosónicas del año 2009 para la Fase II (73 dBA de ruido total diurno en el Edificio crítico, sin medidas de control de ruido) y la situación medida en el año 2011 durante la Fase II (68,1 dBA de ruido total diurno en el Edificio crítico, con medidas de control de ruido), se consiguió una reducción de aproximadamente 4,9 decibeles para la Fase II.

Esta disminución de ruido representa tener el 32% del ruido original proyectado en los vecinos de este Frente de Obra.

$$\frac{L_{\text{total 2011}}}{L_{\text{total 2009}}} = \frac{I_0 \cdot 10^{\frac{68,1}{10}}}{I_0 \cdot 10^{\frac{73,0}{10}}} = 0,32 \quad (10)$$

#### 4 Conclusiones

- Se evidencia que el ruido ambiental generado por los Frentes de Obra del Metro, representa efectivamente un problema para la comunidad.
- A contrastar los resultados de los planos de curvas isosónicas de la Fase I, con las mediciones de ruido ambiental en los edificios afectados, se encontró una alta precisión. Las curvas generadas a través de las mediciones ocupacionales, mostraron niveles de ruido similares a los niveles medidos en los edificios residenciales durante el año 2009 (Niveles de 70 y 67 dBA en curvas y Niveles de 66,4 y 70,7 dBA medidos).

- Durante la Fase I (con Niveles de 70,7 y 66,4 dBA en afectados residenciales), el ruido diurno de la fuente (sólo el Frente de Obra) era de  $L_{\text{eq}} = 66,8$  dBA y contribuía con 41% del ruido total en el año 2009. Esto significa que el ruido de fondo no es despreciable para esta comunidad y contribuye con un mayor porcentaje al ruido total.
- Los planos de curvas isosónicas de la condición del Frente en el año 2011, mostraron que de no tomarse acciones de control de ruido, se tendrían niveles de ruido total de 73 dBA en los edificios más cercanos durante la fase II.
- Los equipos más ruidosos dentro del Frente de Obra para la fase II, que son los ventiladores axiales, el equipo hiperbárico y las torres de enfriamiento, presentaban como frecuencias críticas las bajas (entre 125 Hz y 500 Hz). En función de estas frecuencias, se diseñaron las medidas de mitigación de ruido para la fase II del Frente.
- Las medidas de mitigación de ruido implantadas fueron muy eficientes, los niveles de ruido diurnos de la fuente en la Fase II, fueron de  $L_{\text{eq}} = 64,1$  dBA, 2,7 decibeles por debajo del nivel de ruido de fuente diurno anterior ( $L_{\text{eq}} = 66,8$  dBA, Fase I). Esto quiere decir que se redujo el ruido de la Fase II, un 53% del ruido original.
- En relación al ruido total diurno con medidas de control de ruido y el ruido total proyectado según las curvas isosónicas de la Fase II, hubo una reducción de 4,9 decibeles (73 dBA proyectados Vs 68,1 dBA medidos), lo cual representa reducir a 32% del ruido esperado en este Fase de la construcción.
- Este tipo de estudio ha demostrado ser eficiente en el diagnóstico, proyección y mitigación del ruido ambiental en Frentes de Obra cambiantes. Es necesario perfeccionar estas técnicas para poder brindar una mejoría en las condiciones de vida de los futuros usuarios de sistemas de comunicación como el Metro, que durante sus etapas de construcción, sufren entre otros aspectos, niveles de ruido molestos.
- Según la información del personal de producción y ambiente del Frente de Obra en estudio, desde que las medidas de control de ruido fueron implementadas en 2011, no hubo más quejas de los vecinos del Frente hasta el año 2013, cuando el Frente de Obra se mudó a otra futura estación.

#### Referencias

- Aguilar C, Guerrero L, López E, Rodríguez M y Scarpacci M, 2013, Calidad de vida y comunidades biológicas: análisis del estudio de impacto ambiental del metro en la ciudad de Quito. Letras Verdes, No 13, pp 41 – 49.
- COVENIN 1.671 – 1988 1era Revisión, Fuentes de ruido estacionarias, determinación del ruido. Comisión Venezolana de Normas Industriales Ministerio de Fomento, Fondonorma, CDU: 534.61, ISBN 980 – 06 – 0327 1.
- Decreto 2.217 – 1992, Normas sobre el Control de la contaminación generada por ruido, Gaceta Oficial extraordinaria N°4.418 del 27 de Abril de 1992.

Gómez J, 2011, El ruido: efectos psicológicos y su incidencia económica, *Ingeniería* 21 (1): 75-82, ISSN: 1409-2441. San José, Costa Rica.

Muzet A, 2007, Environmental noise, sleep and health, *Sleep Medicine Reviews*. Vol. 11, pp. 135-142.

Rastelli V y Rastelli Montbrun V, 2009 y 2011, Evaluación de ruido e ingeniería básica para mitigación de niveles de ruido ambiental en Frente de Obra del Metro de Los Teques, Miranda. RPRM & ASOCIADOS C.A.

Thalheimer E, 2000, Construction noise control program and mitigation strategy at the central artery Tunnel Project, *Noise Control Eng. J.* 48 (5), pp. 157 – 165.

**Recibido:** 30 de junio de 2014

**Aceptado:** 15 de junio de 2015

**Rastelli, Victoria:** Doctora en Desarrollo Sostenible (USB 2013), Gerente de Proyectos de la Empresa RPRM & ASOCIADOS C.A., Investigador Asociado del Grupo de investigación Vida Urbana y Ambiente (USB), Ingeniero Mecánico (USB 2005), Co autora de dos libros sobre Desarrollo Sostenible y de seis artículos de investigación en Control de Ruido y Sostenibilidad.

**Montbrun, Nila:** Msc. En Ingeniería Mecánica (UCV 1980), Coordinadora General de Proyectos de Implantación de Sistemas de Gestión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Profesor Titular Departamento de Mecánica de la USB, miembro fundador del Grupo de investigación Vida Urbana y Ambiente (USB), Ingeniero Químico (USB 1975), autora de más de 27 artículos en Ingeniería y Ambiente. Correo electrónico: nmontbru@usb.ve.

**Rastelli, Victor:** Msc. En Ingeniería Mecánica (UCV 1980), Director General y fundador de la Empresa RPRM & ASOCIADOS C.A., Profesor jubilado grado Asociado, Departamento de Mecánica de la USB, miembro del Grupo de Investigación Vida Urbana y Ambiente (USB), Ingeniero Mecánico (USB 1975), autor de más de 30 artículos en Ingeniería y Ambiente. Correo electrónico: rastelli@usb.ve