

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL TRÁNSITO DEL SISTEMA METROBUS EN EL CONFORT DE LOS HABITANTES

Martha Suarez ^(1,*), Miguel Rodríguez González ⁽²⁾ y Rodrigo Rojas Hernández ⁽²⁾

RESUMEN

La construcción de nuevos sistemas de transporte colectivo, como el Metrobus (MBus) de la CDMX, y de nuevas vialidades genera inconformidad en las personas debido al ruido y la vibración que causan. Estas molestias son percibidas principalmente por el tránsito de vehículos pesados que circulan por esas avenidas y calles. A raíz de las quejas expresadas por varias personas en relación con los daños y molestias que les ocasiona el paso del MBus cerca de sus viviendas, se realizaron pruebas de sonido y vibración ambiental en las vialidades por donde transita este transporte. El objetivo de estas pruebas fue determinar los niveles de vibración ocasionados por el MBus y conocer los niveles de ruido que genera. Los resultados del análisis de las señales medidas se compararon con los especificados por diversas normas, incluyendo la norma mexicana, alemana, estadounidense, británica e ISO. Estas comparaciones permiten evaluar si los niveles de ruido y vibración generados por el MBus cumplen con los estándares internacionales y nacionales, y si es necesario implementar medidas adicionales para mitigar los efectos negativos en la calidad de vida de los residentes.

Palabras clave: confort; normas; tráfico vehicular; nivel de vibración; representación espectral

STUDY TO DETERMINE THE INFLUENCE OF METROBUS TRANSIT ON THE COMFORT OF THE INHABITANTS

ABSTRACT

The construction of new public transportation systems, such as the Metrobus (MBus) in Mexico City, and new roadways generates discontent among people due to the noise and vibration they cause. These disturbances are mainly perceived due to the heavy vehicles that travel on these avenues and streets. Following complaints from several people regarding the damage and inconvenience caused by the MBus passing near their homes, sound and environmental vibration tests were conducted on the roads where this transport operates. The objective of these tests was to determine the vibration levels caused by the MBus and to understand the noise levels it generates. The results of the measured signals were compared with those specified by various standards, including Mexican, German, American, British, and ISO standards. These comparisons allow for the evaluation of whether the noise and vibration levels generated by the MBus comply with international and national standards, and if additional measures are necessary to mitigate the negative effects on the residents' quality of life.

Keywords: comfort; standards; vehicular traffic; vibration level; spectral representation

Artículo recibido el 24 de junio de 2024 y aprobado para su publicación el 30 de abril de 2025. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

^(1,*) Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F. mssl@unam.mx.
Autor para correspondencia.

⁽²⁾ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F.
mrod@pumas.iingen.unam.mx, rojash@iingen.unam.mx

INTRODUCCIÓN

Ildelfonso Cerdá decía en cuanto a urbanización:

«He aquí las razones filosóficas que me indujeron y decidieron a aportar la palabra urbanización, no sólo para indicar cualquier acto que tienda a agrupar la edificación y a regularizar su funcionamiento en el grupo ya formado, sino también el conjunto de principios, doctrinas y reglas que deben aplicarse, para que la edificación y su agrupamiento, sirvan tanto para fomentar su desarrollo y vigor para aumentar el bienestar individual cuya suma forma la felicidad pública» (Cerdá, I., 1867).

La investigación sobre el efecto que causaban las vibraciones y el ruido en las personas desde el punto de vista de confort, tuvo un desarrollo importante entre 1940 y 1950 y se enfocaba básicamente en la comodidad de los medios de transporte (St. Clair, 1981; Sovacool, 2009), aunque también existieron intentos de regular las vibraciones y ruidos perturbadores (Montano, 2025). Después de 1950 los estudios abarcaron a las vibraciones que se detectaban en las viviendas y su efecto en la salud y confort de las personas (De la Paz, 2018). No fue sino hasta la década de 1970 que se empezaron a instaurar métodos y criterios para evaluar el confort de las personas con el propósito de establecer normas para su control, apareciendo en 1973 la norma 2631 “Guide for evaluation of human response exposure to wholebody vibration” de la ISO (International Organization for Standardization) (Schiavi y Rossi, 2015). A partir de 1985 muchos países elaboraron sus normas basándose en la ISO 2631 (Kowalska-Koczwara y Stypula, 2016). En México, como en otras partes del mundo, la construcción de varias viviendas y vialidades se llevó a cabo considerando las normas vigentes en ese momento que databan de antes de la aparición de la ISO 2631. En general, se despreciaban los efectos que el ruido urbano y la vibración pudieran tener en la salud, en muchos casos por su desconocimiento. La percepción de peligro y la pérdida de confort no se consideraban, y es por ello qué en la mayor parte de la ciudad, las personas que sienten las vibraciones y el ruido, conscientes o no de la causa de su molestia, tienden a asociarlo con el posible daño a sus viviendas y a reclamar en este sentido.

La Ciudad de México (CDMX) cuenta con diversas vialidades por las que transitan vehículos que generan ruido y vibraciones, afectando la vida cotidiana de sus habitantes. Los sistemas de transporte que actualmente se construyen, como es el caso del Sistema MBus, representan una oportunidad para realizar estudios experimentales en distintos tramos, con el fin de determinar el nivel de vibraciones y ruido que se produce en la vecindad de la vía, producto del tránsito de los autobuses propios del Sistema, y con ello establecer si son un factor determinante en las afectaciones a los vecinos. Con este objetivo, se realizaron mediciones de vibración y ruido ambiental para obtener los espectros representativos del sitio considerando la distancia a la fuente generadora. Estas se llevaron a cabo en distintas fechas entre los meses de julio y noviembre de 2021, donde había restricciones severas de movilidad de las personas (y vehículos) debidas a la pandemia del COVID. Esta situación, que presentaba desventajas por no tenerse las condiciones habituales de uso, también era ventajosa porque podían definirse las vibraciones generadas por el MBus con la contaminación mínima de otras fuentes. Las mediciones realizadas pueden constituir una base experimental para iniciar las labores requeridas a futuro en la construcción de modelos empíricos que expliquen la propagación del movimiento del terreno asociado a fuentes de ondas vehiculares, y para la elaboración de planos de riesgo para el confort.

ANTECEDENTES

Son dos los criterios utilizados para evaluar los niveles permisibles de las vibraciones en edificaciones, uno basado en la capacidad de la estructura para aceptarlas sin que le generen daño, y el otro en el uso para el que fue construida. Este último es el más aceptado en varios códigos de construcción. La

mayoría de los enfoques buscan estimar las amplitudes de vibración ambiental, abarcando las frecuencias a las que responden diferentes tipos de edificios, condiciones del suelo y pavimentos. Las vibraciones que se transmiten a los edificios pueden generar ruido, movimiento, producir vibraciones secundarias y, eventualmente, afectar su funcionamiento o generar daño estructural. En caso de que el origen de la vibración sea un sismo se habla de intensidad sísmica refiriéndose a los movimientos fuertes del terreno medidos por escalas o descriptores, entre los que se encuentran la escala de **Intensidad Sísmica (IMM)**, la velocidad máxima (PGV), aceleración máxima (PGA), etc. Cuando se trata de vibraciones débiles causadas por fuentes como vehículos, trenes o maquinaria, se utilizan otros descriptores que tienen que ver con la aplicación de ciertos filtros como son la severidad de la vibración ($KB_{F_{max}}$), la aceleración r.m.s ponderada (a_{RMS}) y el valor de Dosis (VDV), entre otros, que destacan el ancho de banda en frecuencia en que la respuesta humana es más sensible a la vibración.

Los movimientos débiles del terreno que no son capaces de dañar edificaciones pero que sí causan molestia a las personas, tienen que ver, principalmente, con la percepción de riesgo y la pérdida de bienestar debido a la vibración inesperada, repentina, producto de la construcción intensa o del tráfico vehicular en zonas urbanas. Por lo general, en la CDMX las personas que perciben estas vibraciones no las conciben como una molestia perjudicial y las menosprecian. Las denuncias de inconformidad que llegan a presentar están basadas en el miedo a la pérdida del patrimonio, pero no a la del bienestar (Díaz-Granados, 2024).

Varios países utilizan criterios de niveles de vibración máxima que consideran solo las causadas por actividades humanas. Para ello separan las intensidades y frecuencias asociadas a vibraciones que puedan generar daños en estructuras de las que provocan una percepción de riesgo y pérdida del confort en la población, sin que produzcan daño a las estructuras. Fue a partir de la década de los 70 del siglo pasado, en que se comenzaron a realizar estudios serios basados en estadísticas, para determinar y estandarizar los umbrales de vibración que causaban molestia, fatiga, dolor (Schiavi y Rossi, 2015). A partir de entonces se han desarrollado normas para delimitar y regular las vibraciones permitidas, que dependen principalmente del uso de la estructura y de los materiales que la constituyen.

Cada país ha formulado sus propias normas, definiéndolas considerando distintos parámetros y unidades de medición (en decibeles, VPP, RMS, etc) dependiendo de criterios propios. Algunas de las más utilizadas son la alemana, la británica, la estadounidense y la japonesa. Se ha tratado de unificarlas considerando estándares internacionales (ISO). En RIVAS (2010) se presenta un estudio y comparación de las especificaciones en esas normas.

La PAOT (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la CDMX, 2005) tiene un recuento de las quejas recibidas por alcaldía del año 2003 al 2022. Las principales denuncias ahí presentadas son por ruido, y de las concernientes a la vibración, ninguna se refiere al tránsito vehicular. La normatividad mexicana tanto para vibración (NADF-004-AMBT-2004) como para ruido (NADF-005-AMBT-2013), se refieren a la percepción y al confort de las personas expuestas al ruido y vibraciones mecánicas en los sitios o inmuebles aledaños a fuentes fijas, no hay normatividad nacional para fuentes móviles similares al tránsito vehicular. La construcción de nuevos sistemas de transporte colectivo, o de nuevas vialidades, ha generado inconformidad por ruido y vibración en los vecinos cercanos a ellos, que los perciben debido principalmente al tránsito de vehículos pesados que circulan por esas avenidas y calles. Tal es el caso de la construcción y puesta en operación del Sistema MBus de la CDMX, en especial de las vialidades ubicadas en la zona geotécnica denominada Zona III (zona lacustre) en donde se encuentran suelos muy blandos con altos contenidos de agua.

EXPOSICIÓN Y RESPUESTA DE LAS PERSONAS

En zonas urbanas la exposición de las personas a la vibración generada por el tránsito vehicular y las actividades de la construcción depende de la fuente de emisión (variación y amplitud, duración y frecuencia de ocurrencia) y de su contenido espectral. También influyen la separación entre el emisor y el receptor, las características geológicas que sustentan y rodean al sitio de exposición y las características de la vivienda y del mobiliario, debido a que tenderán a modificar las vibraciones generadas por el emisor.

A las diferentes maneras de medir la exposición de las personas a la vibración, en el caso de los movimientos débiles, es común llamarlas descriptores. Los descriptores pueden referirse a valores máximos de aceleración o velocidad, valores RMS (raíz cuadrática media por sus siglas en inglés), niveles de vibración, valor de cresta, dosis de vibración, severidad, entre otras que se expresan comúnmente en unidades de velocidad y aceleración o alguna potencia de éstas (National Academies, 2010).

Basados en encuestas elaboradas para conocer la respuesta humana ante las vibraciones ocasionadas por maquinaria o por el tránsito vehicular o de trenes, la Organización Internacional de Normalización (ISO) elaboró la norma 2631 con el propósito de estandarizar los métodos de medición de la vibración transmitidas al cuerpo humano dependiendo de su posición corporal. La misma ISO refiere que “No hay suficiente información para mostrar una relación cuantitativa entre la exposición a la vibración y el riesgo a los efectos en la salud. Por tanto, no es posible evaluar la vibración de cuerpo entero en términos de la probabilidad del riesgo a varias magnitudes y duraciones de exposición” (ISO 2631-1-1997). Por esto, en general, los niveles aceptables de vibración se expresan como factores multiplicadores de las aceleraciones establecidas como referencia en las curvas base, ISO 10137 (2007). La incertidumbre asociada a estos criterios está relacionada a variables en las que se tiene poco control, como lo son la historia a la exposición que ha tenido una persona o de sus expectativas sobre la seguridad de su patrimonio, entre otras.

Las curvas base para la aceleración y la velocidad (valor r.m.s) (Figura 1) se refieren a la afectación que el movimiento produce en una persona según la dirección en la que se percibe. Se considera la dirección longitudinal, cuando el movimiento va del pie a la cabeza (curva Z), y transversal cuando la vibración induzca un movimiento de lado a lado o de la espalda al pecho (curva X-Y). En la misma figura se dibuja, con línea más gruesa, el efecto combinado de ambas curvas.

Los factores multiplicadores que aparecen en la Tabla 1, se utilizan para escalar las curvas base y con ello se obtienen criterios satisfactorios de vibraciones en edificios con respecto a la respuesta humana. No es común que se presenten quejas o molestias por exposiciones a vibraciones por debajo de los valores guía, lo que no implica que las quejas o sensaciones molestas comiencen a aparecer en cuanto se alcance el valor que se especifica, pues dependerá de circunstancias y expectativas en las que se tiene poco control. Estos factores están en función del uso que tiene la edificación y del horario, la exposición, y frecuencia de ocurrencia de las vibraciones (ISO 2631-2, 2003). Por ejemplo, para zonas residenciales en horario diurno, y considerando una vibración continua, el valor superior propuesto es de cuatro veces el de referencia, lo que para la aceleración resulta ser de dos gales, que es un valor próximo a la percepción humana. En el apartado 15.5 de NTC (2023) se especifica en diez veces el factor correspondiente a la aceleración vertical perceptible que ha alcanzado el estado límite de servicio de vibraciones por el caminar de una persona en entornos de estructuras de acero.

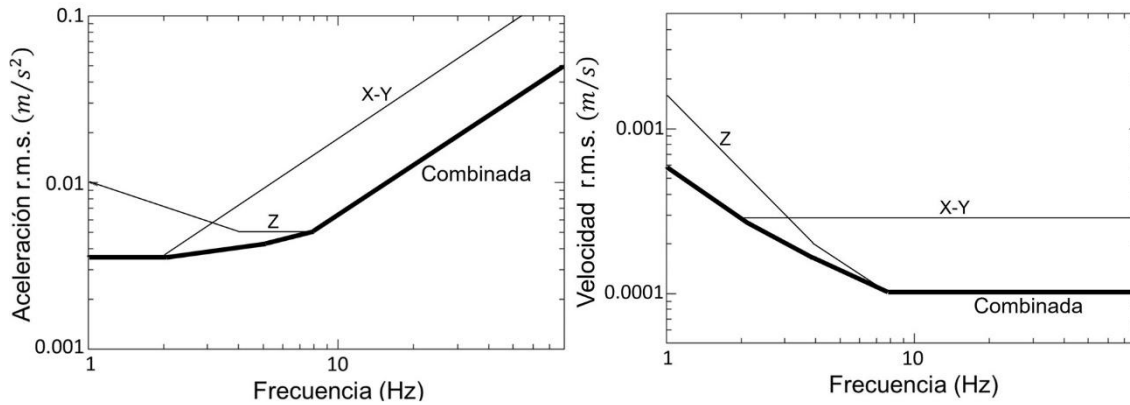


Figura 1. Curvas base para estimar los criterios de aceleración y velocidad (ISO 10137, 2007)

Tabla 1. Factores multiplicadores para niveles aceptables de vibración en edificios para la respuesta humana (RIVAS, 2010)

	Horario	Vibración intermitente o continua	Vibración transitoria con distintas ocurrencias por día.
Áreas de trabajo críticas	Día	1	1
	Noche		
Residencial	Día	2 a 4	30 a 90
	Noche	1.4	1.4 a 20
Oficinas	Día	4	60 a 128
	Noche		
Talleres	Día	8	90 a 128
	Noche		

Baja probabilidad de comentarios adversos debajo de estas magnitudes de vibración.
Los ruidos generados en las estructuras no son considerados.

En las guías o normas de diferentes países se establecen criterios para la velocidad de vibración permisible. Para la velocidad RMS de vibración en su representación espectral, los criterios encontrados en la guía de la agencia de transportes (FTA) de EUA (2018) y en la norma alemana DIN4510 – 2 (1999) se consignan en la Figura 2, donde las curvas se presentan en unidades de decibelios de vibración (VdB, con referencia a 10^{-6} in/s) y en mm/s.

En la normativa FTA (2018) se indica que el nivel aceptable para los valores RMS de la velocidad de vibración para áreas residenciales, horario nocturno, es de 72VdB o menor (el umbral de percepción humana está cerca de 65 VdB). Las exposiciones a valores superiores de 85 VdB podrían resultar incómodas. Las velocidades de 100 VdB (aproximadamente 2.54 mm/s) pueden relacionarse con el umbral de riesgo a daño cosmético menor, para algunos edificios. La agencia FTA utiliza la representación espectral en bandas de frecuencia de 1/3 de octava. En sus normas incluye, además, los límites de vibración permitidos para equipo sensible (curva VC's de la Figura 2).

El descriptor básico en la norma DIN4150–2 (1999) es la severidad ponderada de la vibración, que es una estimación local del valor de la velocidad RMS normalizada y ponderada, a medida que se desplaza la ventana de cálculo sobre el registro. Enseguida se valora la severidad comparando el nivel máximo KB_{Fmax} con tres límites denotados como A_u , A_0 y A_r para una evaluación total. A pesar de que ninguna unidad se

especifica en la norma, la unidad asociada es claramente mm/s. Para viviendas y edificaciones similares, la norma DIN4150-2 indica los valores límite de velocidad permisible y de ancho de banda (Figura 2). En horario nocturno los niveles de velocidad permitidos están más restringidos. A diferencia de las normas ISO 2631-2 (2003) y la británica BS6841 (1987) que tienen criterios de carácter informativo, la DIN 4150-2 es normativa, así, en caso de que las exposiciones obtenidas de la experimentación sean menores del límite propuesto A_u , no se espera que se presenten molestias; si quedan por encima pero su valor no es mayor a A_0 , se debe calcular el valor de KB_{FTT} que no debe ser superior a A_r y que considera factores como el tiempo de exposición y la variabilidad de las magnitudes en las vibraciones; si no se cumplen estas condiciones se deberán realizar estudios que permitan mitigar la exposición a la vibración.

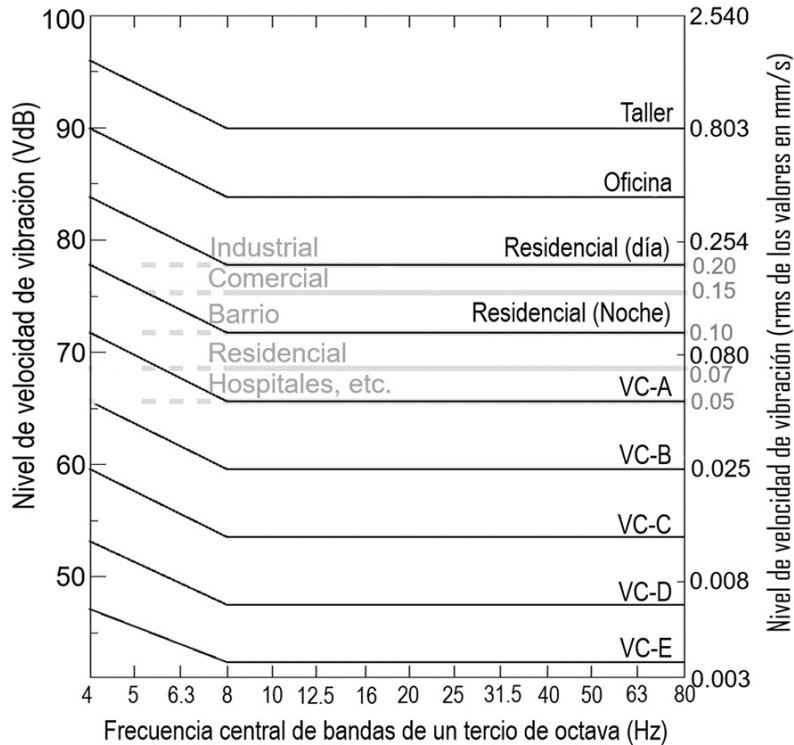


Figura 2. Criterios de evaluación de niveles de vibración de agencia FTA (líneas gruesas) y el criterio A_r , para horario diurno, de la segunda etapa de evaluación de la norma DIN 4150-2 (líneas grises)

MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

En general, se reconoce que las molestias asociadas a la vibración en la superficie del terreno provocadas por los automóviles son poco comunes cuando éstos operan a velocidades menores a 40 km/h. Algo similar sucede con los autobuses pues sus sistemas de suspensión como las llantas de hule y amortiguadores, aíslan la propagación de las vibraciones en la superficie del terreno. Factores como las condiciones de las avenidas de tránsito, esto es, la cantidad y tamaño de baches, topes, juntas de expansión y otras discontinuidades en su superficie de rodamiento, también influyen en su transmisión. En este trabajo se revisa el movimiento generado por el tránsito vehicular, que después de una serie de modificaciones que sufre en su trayecto hasta el sitio donde se registra, es percibido por la población y soportado por las construcciones.

La formación geológica más somera que sustenta gran parte de la CDMX, en caso de sismo actúa como filtro que puede amplificar o restringir la vibración predominante en un ancho de banda definido. Algo similar ocurre con los niveles de vibración causados por el tránsito vehicular percibidos por la población. Para su estudio se analiza la modificación que tiene el movimiento desde la fuente hasta el sitio de exposición. El problema es complejo. Las etapas principales que deben considerarse son:

1. Fuente de ondas e intensidad de las vibraciones.
2. Trayecto de las ondas.
3. Las propiedades dinámicas y geométricas de las capas de suelo y de las edificaciones.

Recientemente, con la adecuación de vialidades existentes en la CDMX para la circulación de nuevos sistemas de transporte, varios habitantes vecinos a esas zonas presentaron sus quejas en relación con las vibraciones dentro de sus viviendas que, según ellos, ocurren debido al paso de estos nuevos vehículos, causando daños a su propiedad. Con el propósito de cuantificarlas, se llevó a cabo un estudio en las avenidas para medir la amplitud de las ondas generadas por los vehículos, y su atenuación hacia las casas afectadas.

Inicialmente se contempló realizar mediciones de vibración ambiental, sonido y video en vialidades existentes con intenso tráfico vehicular, en las distintas zonas geotécnicas de la CDMX. Sin embargo, debido a las restricciones de movilidad generadas por la pandemia en 2021, los experimentos se realizaron en los sitios y los horarios disponibles según lo establecido por el personal de la Dirección General de Obras Públicas CDMX, y no con los aforos que se tenían contemplados. Esto permitió, en cierta medida, tener un mayor control de las fuentes generadoras y apreciar su contribución en las vibraciones que se presentaban.

El estudio se realizó en la porción sur de la cuenca del valle de México, delimitada por las Sierras de Chichinautzin, Nevada y Las Cruces. La parte del sistema denominado MetroBus (MBus) analizada, correspondió a la Línea 5 en dos tramos, uno ubicado en la zona geotécnica II (zona de transición) que va desde Calzada Taxqueña a Calzada las Bombas (en adelante “primer tramo”) y el otro en la zona III (lacustre) que está entre las estaciones de Calzada las Bombas y Prolongación Ahuejotes (“segundo tramo”) (Figura 3).

El “primer tramo” se localiza sobre estratos arenosos y limo-arenosos, intercalados con capas de arcilla lacustre; y en el “segundo tramo” se encuentran grandes depósitos lacustres de arcilla altamente compresibles, con espesores que pueden llegar a ser superiores a 50 metros, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo y arcilla, cubiertos por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales (Ingenieros Geotécnicos y Estructuristas. S.A. de C.V, 2019).

TRABAJOS DE CAMPO

Se llevaron a cabo tres campañas de medición durante el día comenzando aproximadamente a las 7:00 am, que comprendieron las siguientes estaciones del MBus:

- Primera campaña: Manuela Sáenz - Tepetlapa (Zona de transición). Realizada del 7 al 9 de julio de 2021.
- Segunda y tercera: Muyuguarda – Preparatoria 1 (Zona lacustre). Realizadas el 22 de julio y 11 de noviembre, respectivamente, del 2021.

El equipo utilizado consistió en:

- Sensores de velocidad marca Lenartz, uno de periodo corto (1s) y el otro de periodo intermedio ($T_0=5$ s).

- Sensor de aceleración de Guralp, modelo Fortis con respuesta plana en el ancho de banda DC a 100 Hz.
- Micrófono omnidireccional Behringer modelo ECM8000. Registro continuo de audio.
- Cámara GoPro Hero 7 Black, 125 cuadros por segundo para registro de video.
- Sismógrafo de exploración somera Geometrics y modelo Geode.
- Computadora portátil Lenovo, modelo T470.

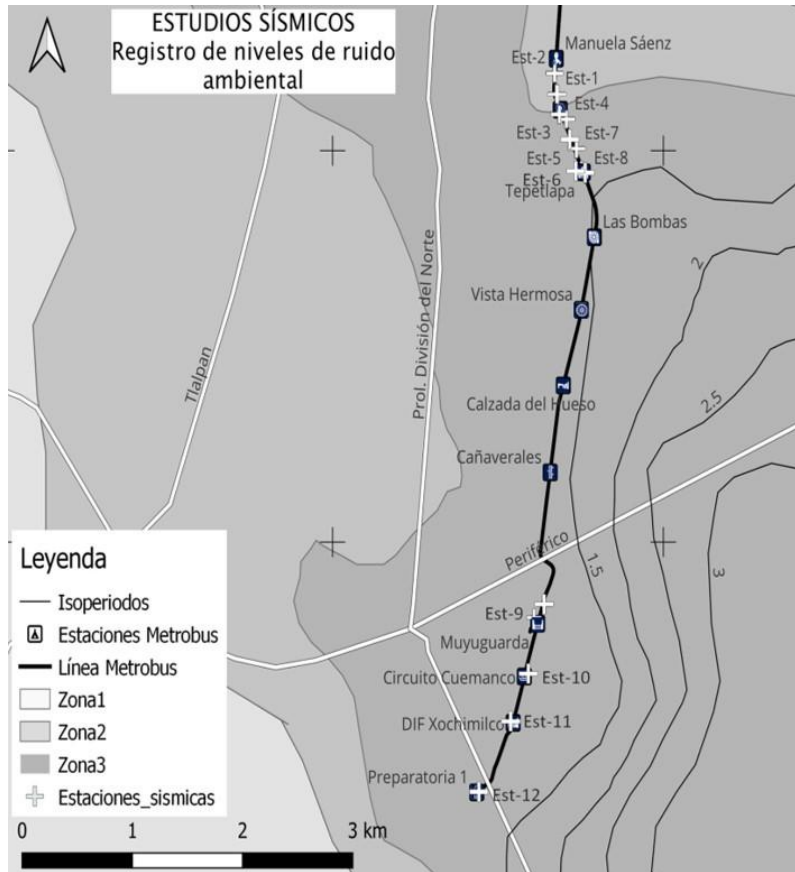


Figura 3: Localización de la línea 5 del MBus y de las estaciones donde se realizaron las mediciones

Las mediciones acústicas se realizaron de manera simultánea a las del movimiento del terreno con micrófonos ambientales seleccionados para medir la presión acústica de fuentes de sonido no diferenciadas.

En la primera y segunda campañas las mediciones se efectuaron en la banqueta contigua a la vía Norte-Sur del MBus. En la tercera campaña el propósito fue medir la atenuación de las ondas, por lo que los sensores se localizaron sobre la avenida Bases Orgánicas que es perpendicular a la vía, con una separación de 50 metros entre ellos. En esta tercera campaña no se utilizó el equipo de audio. Principalmente interesaba el tramo de la Línea 5 ubicado en la zona geotécnica clasificada como zona III (lacustre), debido a que los reclamos sobre los niveles acústicos altos y vibraciones del terreno provenían de los vecinos de esa zona.

De manera simultánea a la medición de las vibraciones, se grabaron videos con el propósito de ubicar la posición de los vehículos que transitaban cerca de los sensores, y los lapsos en que un vehículo del MBus dominaba en las imágenes.

El proceso que se siguió para la adquisición y análisis de las vibraciones fue el siguiente: a) Instalación y orientación de los sensores. El componente longitudinal (L) tanto del sismómetro como del acelerómetro quedó paralelo al trazo de la vía por donde circulan los camiones del MBus que tiene una orientación cerca de la dirección Norte-Sur (Figura 3); así, el valor positivo del componente longitudinal corresponde aproximadamente con el Norte. b) Operación simultánea de los equipos y registro de aproximadamente 40 minutos. c) Correlación entre los niveles de vibración del terreno, la intensidad acústica y la posición de las fuentes de ondas. Estimación de descriptores y comparación de los parámetros estimados con los de algunas normas.

RESULTADOS

Vibración

Durante la medición de las vibraciones se utilizó un acelerómetro FBA acoplado a registrador de 24 bits, ambos de GURALP. Se monitoreó en los tres componentes: vertical (V), longitudinal (L) y transversal (T), con el componente longitudinal siguiendo la dirección de la vialidad (hacia el Norte), que contiene a la línea 5 del MBus. Para las mediciones de la velocidad de la vibración se usaron dos sismógrafos, uno de periodo corto ($T_0 = 1.0s$) y otro de periodo intermedio ($T_0 = 5.0s$), ambos de Lennartz, acoplados a registradores SARA C20 y REFTEK, respectivamente. El sensor de periodo intermedio aportó información complementaria entre 0.2 y 50 Hz.

La toma de datos de velocidad y de aceleración de la vibración se hizo con cadencia de 100 muestras por segundo y una duración con al menos de 30 minutos de registro simultáneo.

La vibración asociada al tráfico vehicular y la actividad propia de las personas en horario diurno en los sitios seleccionados, principalmente durante la mañana, resultó ser un movimiento frecuente, periódico, con aceleraciones que alcanzaban, y a menudo excedían medio gal, como se puede observar, por ejemplo, en el registro presentado en la Figura 4. La forma de las señales indica que la amplitud del movimiento crece y decrece en ciclos con periodo aproximado de entre 80 y 120 segundos. Los máximos observados coincidían con la separación mínima entre los vehículos y el equipo sensor, muy probablemente asociado al ciclo con que operan los semáforos cercanos a los sitios de mediciones.

Asumiendo que en horarios diurnos ocurre un movimiento repetitivo como el que se muestra en la Figura 4 medido en el sitio 9 (estación de medición 9), entonces se puede esperar que en un lapso 12 horas (horario diurno) se presenten 360 máximos de vibración en esa zona. Este número de máximos podría aumentar en magnitud sin las restricciones de la movilidad que se tuvieron debidas a la pandemia del 2021.

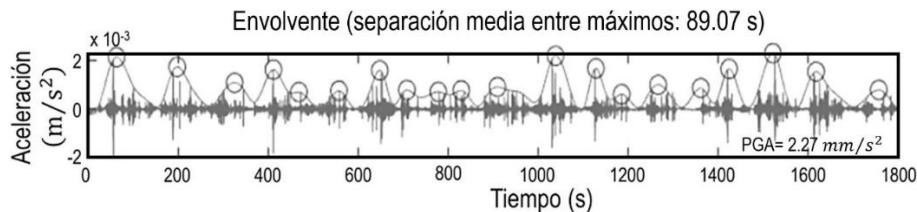


Figura 4. Periodicidad obtenida del promedio de los máximos de la envolvente de la aceleración observada en el sitio 9 en el componente transversal (T)

Los registros de aceleración se acondicionaron mediante la remoción de la media, la tendencia y pasándolo por el filtro de ponderación Wd (ISO 2631-1:1997, BS 6472-1:2008). Enseguida se obtuvieron

la aceleración RMS, el máximo de la aceleración RMS operante, una estimación del factor de cresta (FC) y el valor de vibración máxima transitoria (MTTV) para cada registro.

Los valores obtenidos para la aceleración RMS operante del componente vertical de once de los sitios analizados exceden el umbral aproximado de percepción de 0.015m/s^2 . Incluso en esos sitios el factor de cresta, FC, excedió el umbral de nueve veces, por lo que se requirió de la estimación del Valor de Dosis (VDV). En seis de esos sitios, el valor VDV es superior al límite permisible ($0.26\text{ m/s}^{1.75}$) consignado en la NADF-004-AMBT (2004), por lo que estos seis sitios quedan clasificados como sitios con “Probables comentarios adversos” (Figura 5). Ver BS6472-1 (1997).

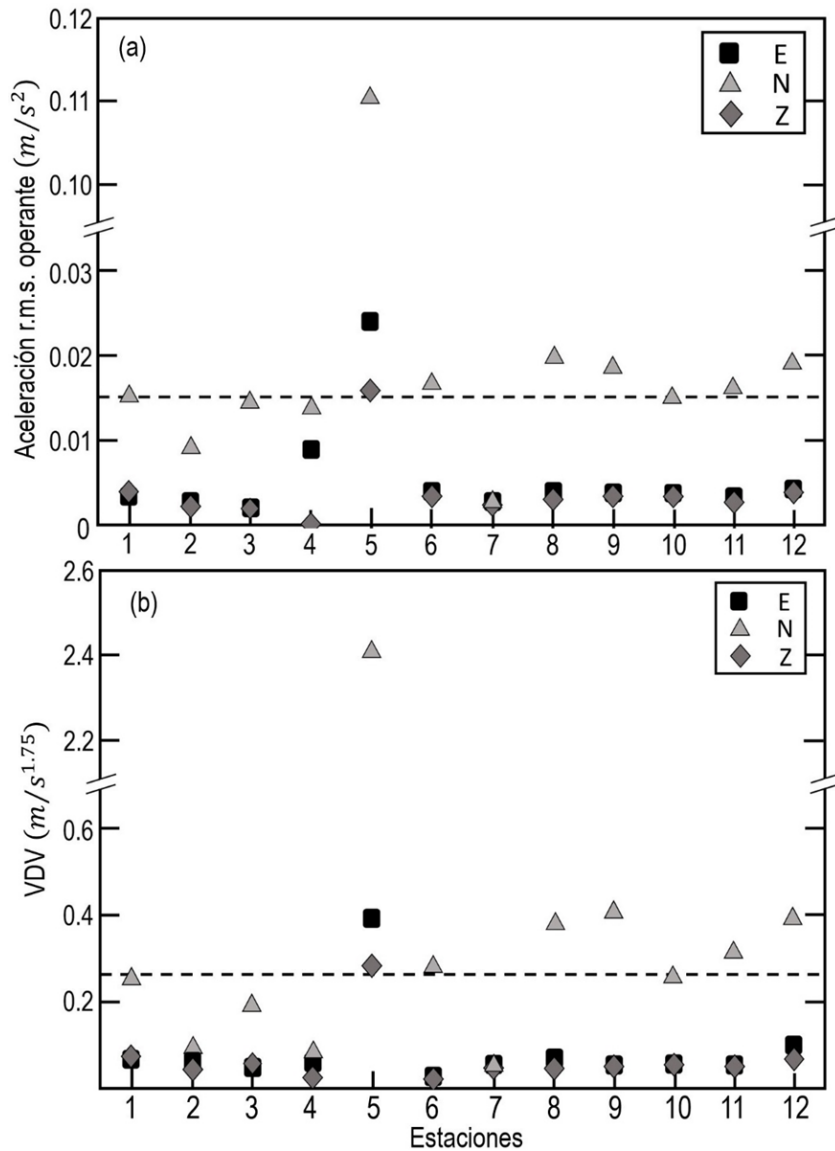


Figura 5. (a) Aceleración RMS operante. (b) Valor de dosis de vibración (VDV). Las líneas a trazos indican los valores límite de 0.015 m/s^2 y el permisible de $0.26\text{ m/s}^{1.75}$, respectivamente

Considerando lo propuesto por la norma DIN 45669-1 (1981), el procesamiento de los registros de velocidad inició con su normalización y ponderación. Enseguida se estimó la severidad máxima ponderada de la vibración, KB_{Fmax} , para los tres componentes.

Sólo en el tercer sitio (estación 3) la severidad de la vibración es menor a A_u y pasa la norma en esta primera etapa. Los once sitios restantes tienen KB_{Fmax} dentro del intervalo $A_u < KB_{Fmax} < A_0$ para el componente vertical, lo que indica que estos sitios deben pasar a la segunda etapa de evaluación. En esta segunda etapa se calcula el valor RMS de los máximos de severidad asociados a ventanas de 30 segundos, KB_{Fm} , y con esto el valor de severidad ponderada que incluye el tiempo de medición, KB_{T_r} . Los valores obtenidos para los once sitios son menores a 0.07, que es el límite permisible (Figura 6).

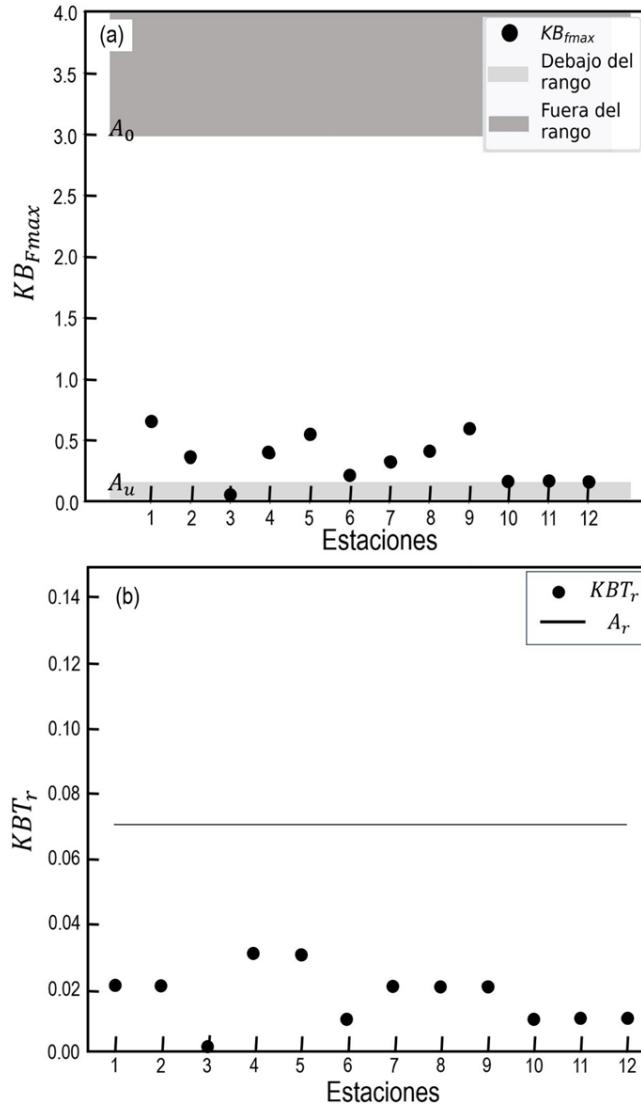


Figura 6. Para el componente vertical los registros de las 12 estaciones estudiadas (a) severidad máxima de vibración, KB_{Fmax} y (b) severidad máxima en lapsos de 30 s, KB_{T_r} . (DIN4150-2, 1999)

Cuando se compara con los valores guía propuestos por la Agencia de Transportes de Estados Unidos (FTA, 2018), para cada sitio analizado la velocidad de vibración RMS máxima observada a una distancia D

del origen de la vibración, es anómalamente alta para el componente vertical (Figura 7). Los niveles de vibración observados son mayores que los propuestos para vehículos con llantas de hule e incluso, están por arriba de los valores indicados para Tren ligero. En la estimación de los niveles de vibración anteriores no se tomaron en cuenta las características geológicas del sitio, la rapidez en que circulan los vehículos ni las condiciones de la vía, por lo que podrían estar subvaluados dado que las correcciones comúnmente incrementan el nivel.

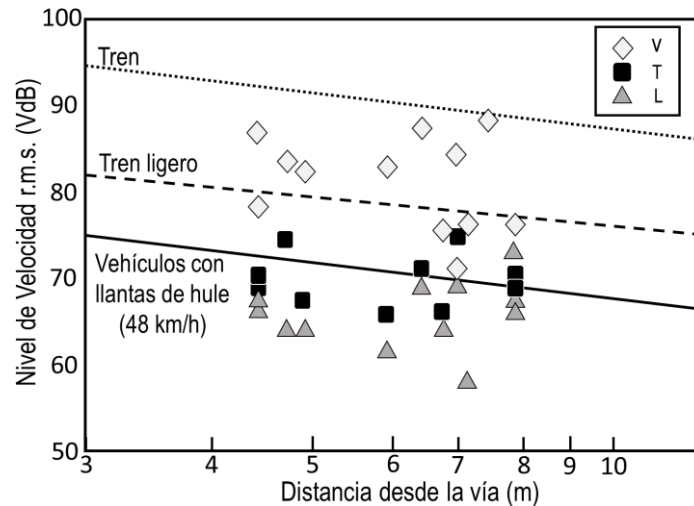


Figura 7. Velocidad de vibración RMS máxima estimada en los 12 sitios analizados obtenida a partir de los sensores de periodo corto de 1s utilizados para su medición. Las líneas indican los valores guía según la FTA (2018)

Cuando los niveles de vibración superan los criterios de la FTA, se recomienda un análisis más detallado utilizando la representación espectral de la velocidad RMS correspondientes con ancho de banda de 1/3 de octava en las diferentes frecuencias centrales propuestas (ANSI, 2004).

La estimación espectral de las velocidades RMS de los registros obtenidos con sensores de velocidad ($T_0=1s$) de los doce sitios analizados se presentan en la Figura 8, junto con las curvas que contienen los valores límite propuestos por la agencia FTA y la norma DIN04150-2 (1999). En general, las amplitudes estimadas para el componente vertical son mayores que para los componentes horizontales para frecuencias superiores a 0.5Hz. Para los tres componentes su forma espectral indica que hay tres anchos de banda con máximos locales, uno cerca de 0.6 Hz, otro cercano a 3.0 Hz y el tercero en 12 Hz. Los niveles de vibración estimados son menores a 65 VdB (0.05 mm/s) y los mayores están en el ancho de banda entre 1 y 6 Hz. Note que 65 VdB es, aproximadamente, el criterio límite para inmuebles especialmente sensibles como los hospitales (norma DIN04150-2, 1999). Para el ancho de banda entre 0.2 y 2 Hz, la máxima amplitud alcanza los 50VdB, rango de frecuencia no considerado en las normatividades para movimientos débiles.

Para conocer el decrecimiento de la intensidad de la vibración con la distancia se instaló un grupo de sismógrafos en un arreglo lineal. El equipo fue instalado en cinco sitios dispuestos de manera colineal sobre la avenida Bases Orgánicas, que es perpendicular a la avenida Muyuguarda por donde circula los autobuses del sistema MBus. La estación de referencia quedó, aproximadamente, a diez metros de la estación del MBus “Muyuguarda” y la separación entre estaciones fue de 50 metros. Se hicieron dos tomas de datos, utilizando la misma estación de referencia, debido a que se contó sólo con tres equipos. El sitio se encuentra en la zona de arcillas blandas de la CDMX.

El procedimiento consistió en identificar señales similares en los registros simultáneos para enseguida calcular las velocidades RMS, obtenidas en anchos de banda de 1/3 de octava. Los resultados indican que el decaimiento de las aceleraciones RMS se puede separar en dos grupos, uno con frecuencias menores a 5Hz y el otro con frecuencias mayores. En la Figura 9 se grafica el decaimiento del promedio de las velocidades RMS de estos dos grupos. Para el grupo con frecuencias mayores a 5Hz, el decaimiento de la velocidad es de aproximadamente del 75% entre la estación de referencia y la más cercana a ella, separada 50 m. Considerando que los niveles de vibración obtenidos están por debajo de los límites recomendados por las normas FTA (2018) y la norma DIN 4150-2 (1999) (ver Figura 8), la atenuación que presentan los movimientos medidos indica que es poco probable que las personas en este sitio, separadas hasta dos o tres decenas de metros de la vía, experimenten molestia por las vibraciones emitidas por tránsito vehicular y el Sistema MBus de la CDMX.

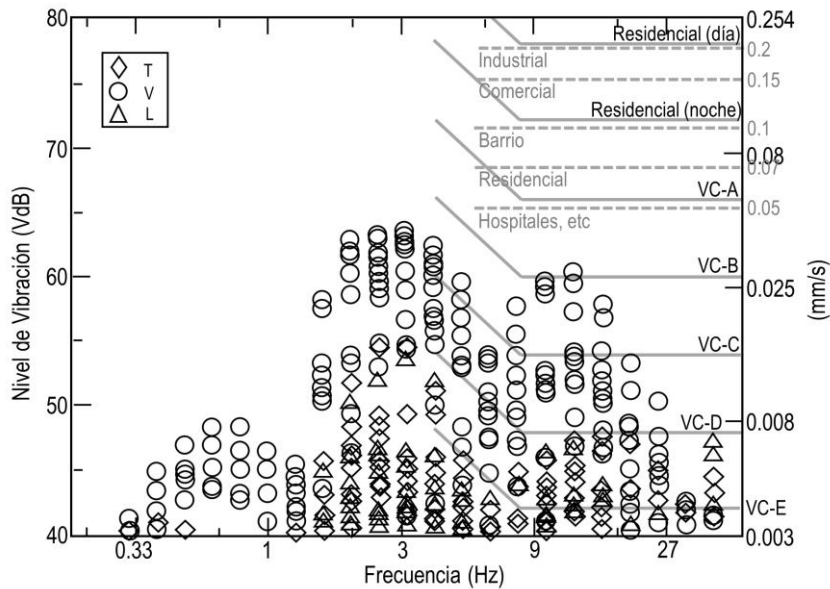


Figura 8: Representación espectral entre 0.2 y 50 Hz de las velocidades RMS estimadas de los registros obtenidos con sensores de período de 1.0s

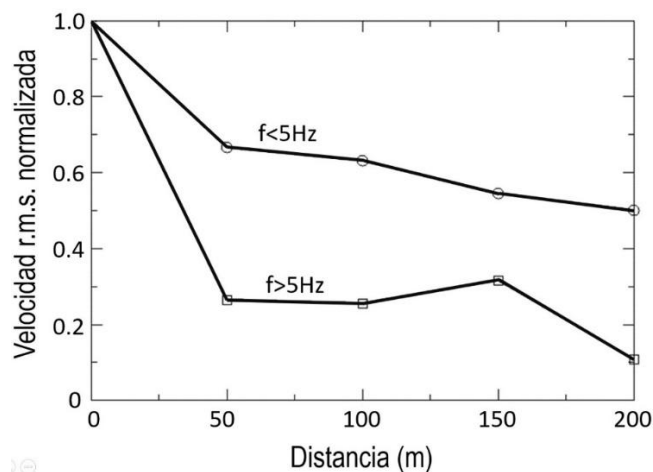


Figura 9. Decaimiento del promedio de las velocidades RMS, en función de la distancia, para frecuencias menores y mayores a 5 Hz

Audio

Las mediciones de la presión acústica se realizaron con el par micrófono-ordenador a tasa de 44100 muestras por segundo, con el propósito de que las fluctuaciones de la presión durante el tiempo de observación quedaran bien representadas en los registros para garantizar una estimación de valores pico y características impulsivas apropiados.

En las mediciones acústicas se utilizaron micrófonos ambientales, omnidireccionales, modelos ECM-8000 de Behringer, adecuados para medir la presión acústica de fuentes de sonido no diferenciadas que tienen respuesta plana entre 0.015 y 10 KHz. La duración aproximada de los registros fue de 30 minutos, lapso simultáneo en el que se monitoreó la vibración. En cada sitio de medición se instaló el micrófono separado de la vía de interés entre dos y siete metros a una altura superior a un metro del suelo. Las señales capturadas se grabaron en un ordenador portátil. En toda su duración el carácter de los registros medidos es consistente, con máximos que sobresalen y que son fácilmente identificables con valores de presión entre uno y tres pascales.

A cada registro de audio se le aplicó el filtro de ponderación A y se calculó la representación en bandas de un tercio de octava. El espectro de la Figura 10 es típico de los calculados en las doce estaciones, con un máximo espectral global aproximado entre 500 y 800 Hz, así como varios máximos locales de los que el de 100Hz es relevante. Las amplitudes de las densidades de potencia están en decibeles con referencia a 1 Pa²/Hz.

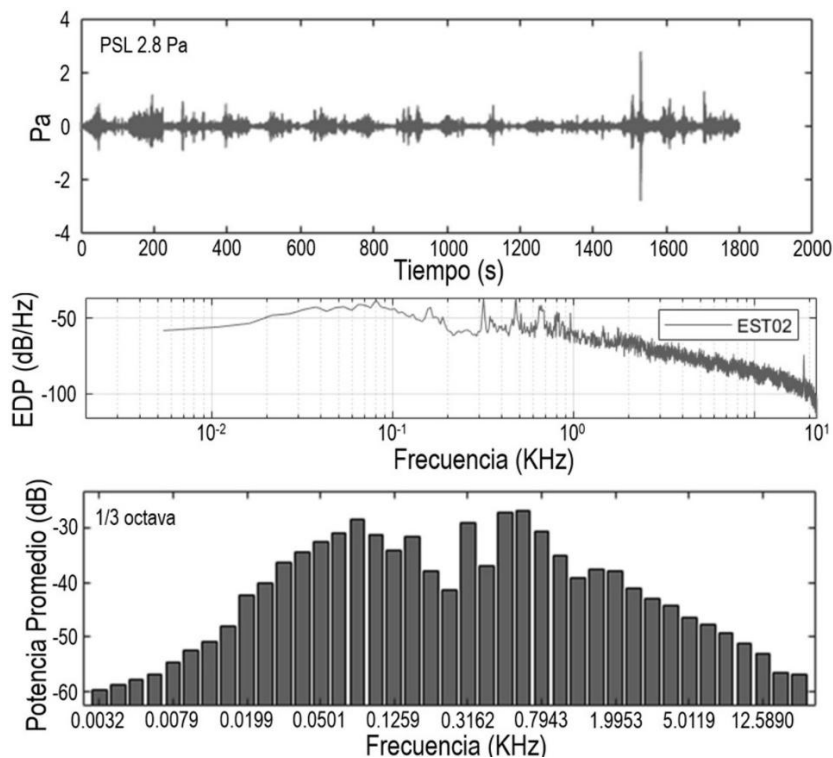


Figura 10: Serie de tiempo de presión acústica, espectro EDP y Potencia promedio del registro (estación 2)

Al igual que con la vibración, en los registros acústicos medidos en función del tiempo se observa cierta periodicidad con separación promedio entre los máximos de aproximadamente 140 segundos. Por presentar un caso, el cálculo de la separación entre los máximos de la envolvente analítica del registro

original de la estación 2 resulta ser de 119.5 s (Figura 11), que es muy cercano a la duración nominal de 120 s de los semáforos en la ciudad de México.

DISCUSIÓN

El propósito de este estudio fue identificar los niveles de vibración generados por el sistema de transporte MBus de la CDMX para determinar el grado de afectación que pudieran generar en los vecinos y sus viviendas. Las mediciones se realizaron en el año 2021 durante la pandemia, con restricciones severas de movilidad de personas y vehículos particulares. Al ser tan escaso el tránsito vehicular, se pudieron identificar las vibraciones provenientes del sistema MBus. No se tuvo el acceso a las viviendas de las personas que denunciaron molestia por las vibraciones, lo que imposibilitó cumplir con las especificaciones señaladas en distintas normas (FTA, ISO y DIN) en cuanto a la ubicación de los equipos para realizar las mediciones, que está determinada considerando los lugares dentro de las estructuras en donde se esperan las mayores amplificaciones del movimiento. El nivel de vibración medida sobre la banqueta en general fue menor de 2 gales (Figura 5) que corresponde aproximadamente a una intensidad de I en la escala de IMM, y es del orden de 10 veces menor que lo indicado en las “curvas base” que representan los valores mínimos para que la vibración afecte a una persona (Figura 1). Por lo anterior creemos que las molestias expresadas por los vecinos se deben al tráfico normal, cuando no hay restricciones de circulación, o al paso de vehículos más pesados como los tráileres que también utilizan esas vialidades.

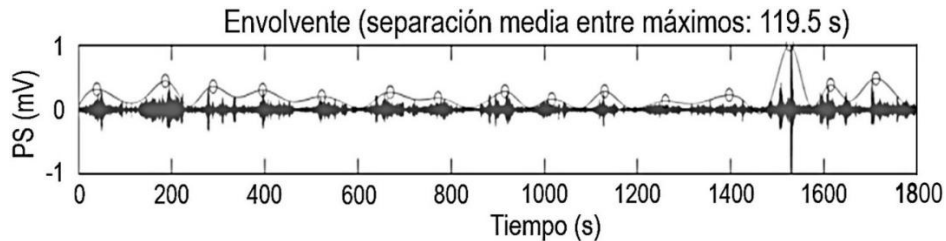


Figura 11: Periodicidad de la señal en la estación 2 considerando la separación promedio entre los máximos de la envolvente

De acuerdo con la amplitud alcanzada por las señales que medimos, éstas deben clasificarse por debajo del límite que separa las vibraciones que pueden causar daño de aquellas que causan molestia y pérdida de confort. En esta categoría se evalúan los valores máximos de V_{RMS} y se comparan con los criterios de la curva base correspondiente a vibraciones al nivel del terreno (FTA, 2018). El carácter de la señal generada en la fuente móvil emisora de vibración. Las llantas de hule y las distancias de separación de la fuente al sitio de exposición, en este estudio entre 4 y 12 metros, tienen valores cercanos al límite (grosso modo de 70 VdB), ver Figura 7. Los valores máximos de la velocidad V_{RMS} estimados para el componente vertical de los doce sitios, exceden el criterio límite alcanzando cifras cercanas a los 90 VdB en el sitio 8.

La evaluación, en este punto, tiene dos vertientes; en la primera los valores estimados por los descriptores en la superficie del terreno deben ser ponderados para tratar de predecir el nivel de vibración en futuras instalaciones o inmuebles, para lo que se requiere de la asignación de factores de corrección asociados a la atenuación de las señales con la distancia, la estructura de la velocidad de cortante, las características del pavimento y de los vehículos generadores de la vibración, y si las condiciones geológicas del sitio propician una eficiente propagación de las ondas (de ello dependerá si es necesario aplicar los ajustes de corrección). En la otra vertiente se cuenta con la evaluación de la vibración en inmuebles ya existentes, para los que hay normatividades comúnmente informativas como en la ISO2631-2 (1989) y en BS6472-2 (1999), o restrictivas como es el caso de la DIN 4150-2 (1999), en donde se indican valores límite

para descriptores similares a los de la primera etapa u otros complementarios, a ser comparados con aquellos estimados desde mediciones hechas dentro del inmueble.

Debido a que en la mayoría de los sitios analizados los valores estimados para el componente vertical excedieron el límite asociado a la primera etapa de la evaluación del manual de FTA, se requirió pasar a una segunda etapa de evaluación. En esta segunda etapa los descriptores estimados indican que sus valores máximos están por debajo de los umbrales permisibles. Para el descriptor A_r de la norma DIN04150, en los doce sitios analizados, los resultados obtenidos quedaron por debajo de 0.07 mm/s (Figura 6), valor límite correspondiente a zonas residenciales. En Alemania y otros países la norma DIN04150 tiene un carácter restrictivo que contrasta con el carácter sólo informativo del manual de la agencia FTA y el de las normas ISO2631 y BS6841.

Sería deseable realizar este estudio en las distintas zonas geotécnicas de la CDMX, en condiciones de tránsito normal, ya sin las limitaciones de movilidad que se tuvieron por la pandemia.

Las normas ISO2631 y BS6472-1 indican que las mediciones de vibración deben realizarse dentro de las edificaciones, pero por la falta de acceso a las viviendas, los sensores se ubicaron en su periferia. Considerando que la Norma mexicana NADF-004-AMBT-2004 referente al confort de las personas expuestas a vibraciones mecánicas no establece que los sensores deban ubicarse dentro de las estructuras sino sólo cercanos a la fuente emisora, los valores obtenidos en este trabajo pudieron compararse con los señalados por esta norma, observando que para la aceleración, la raíz cuadrática media ponderada del componente vertical de los sitios analizados excede tanto el límite máximo permisible de 0.015 m/s² como el límite para el valor de dosis de 0.26m/s^{1.75} consignados en la NADF-004-AMBT-2004. No siendo así para los componentes horizontales.

La forma de las señales obtenidas en este estudio muestra que es periódica cuando se grafica en función del tiempo, de tal manera que su intensidad crece y decrece en ciclos con duración de 120 a 180 segundos. Esta periodicidad muy probablemente está relacionada con la operación de los semáforos que controlan el tránsito vehicular y ayudan en su gestión. Si se consideran las condiciones de restricción de movilidad debidas a la pandemia, se puede esperar que en un lapso de 12 horas ocurran al menos aproximadamente 360 máximos de vibración en la zona. La amplitud, y quizá la frecuencia con la que se presentan, podría ser mayor en condiciones normales de tránsito de vehículos.

El decaimiento de las amplitudes de la vibración producida por el tráfico vehicular en la zona de la estación Muyuguarda del sistema MBus indica que, para frecuencias mayores a 5Hz y en 50 metros de separación el decremento de la amplitud es del 75 %.

Las especificaciones de duración y sitios recomendados por las distintas normas (FTA, ISO y DIN) no se siguieron debido a las restricciones que se tuvieron durante la pandemia. Consideramos, sin embargo, que comparar los resultados obtenidos en este trabajo puede dar una idea de la generación de la molestia del tránsito del MBus a los vecinos aledaños a la vialidad. Particular inquietud causa el conocer que hay perturbaciones que generan vibraciones energéticas en bajas frecuencias que deben considerarse puesto que su ancho de banda sugiere una interacción resonante que pudiera amplificar el movimiento en las viviendas.

Por último, a raíz de los resultados obtenidos en condiciones atípicas, se refuerza la idea de realizar este tipo de estudios en las distintas zonas geotécnicas de la ciudad para contar con normas que se adecúen a las características de la CDMX.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue patrocinado por DGAPA-UNAM, Proyecto IT101020, México.

Se agradece al personal de la Dirección General de Obras Públicas de la CDMX, en especial al Ing. José Luis Pichardo, por su apoyo en la realización de este estudio en condiciones difíciles durante la pandemia.

El software EVAiCON para la evaluación de mediciones de vibración utilizado en este trabajo es autoría de Brenda Lázaro Bosques y de Mauro Miguel De Jesús García Enriquez.

REFERENCIAS

- ANSI s1.11 (2004). *Specification for octave-band and fractional-octave-band analog and digital filters*. American National Standards Institute.
- BS Std. 6841 (1987). *Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock*. United Kingdom Standards.
- BS 6472-1 (2008). *Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings Part 1: Vibration sources other than blasting*. United Kingdom Standards.
- Cerdá, I. (1867). *Teoría general de la urbanización y aplicación de sus principios y doctrinas á la reforma y ensanche de Barcelona*, Tomo I, Imprenta Española, Torija, 14, Bajo, Madrid.
- De la Paz Mellado V (2018). *Vibraciones en edificios. Estándares de medición y efectos en la legislación extranjera*. Asesoría Técnica Parlamentaria, mayo 2018. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile/BCN. Disponible en https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/25701/2/BCN_vibraciones_en_edificios_Definitivo.pdf
- Díaz-Granados P. (2024). *Análisis espacial de las denuncias ciudadanas por ruido y vibraciones en la Ciudad de México* Publicación Semestral Pädi Vol. 12 No. Especial 3, pags. 43-51; DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial3.13306>
- DIN 4150 – 2 (1999). *Structural vibration – Human exposure to vibration in buildings*. Germany Standards.
- DIN 4150 – 3 (2016). *Structural vibration – Effects of vibration on structures*. Germany Standards.
- DIN 45669 – 1 (1981). *Mechanical vibration and shock measurement. Part 1: Measuring equipment*. Germany Standards.
- Federal Transit Administration (FTA) (2018). *Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual*. FTA Report No. 0123. US Department Transportation.
- García-Bellido, J. (2000). *Ildefonso Cerdá y el nacimiento de la Urbanística*. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Universidad de Barcelona [ISSN 1138-9788]. N° 61.
- Ingenieros Geotécnicos y Estructuristas. S.A. de C.V (2019). *Estudio de medición de ruido sísmico (vibraciones) inducido en el subsuelo por la ampliación de la línea 5 del metrobus, a ubicarse sobre la Av. eje 3 oriente (Carlota Armero) tomando como punto de partida la estación “Manuela Sáenz” y final la “Tepetlapa”, alcaldía de Coyoacán, en la ciudad de México*. Elaborado para la Secretaría de Obras y Servicios. Gobierno de la Ciudad de México.
- ISO 2631-1 (1997). *Mechanical vibration and shock -Evaluation of human exposure to whole-body vibration -Part 1: General requirements*. ISO Standards.
- ISO 2631-2 (2003). *Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 2: Vibrations in buildings (1 Hz to 80 Hz)*. ISO Standards.
- ISO 8041 (2005). *Human response to vibration — Measuring instrumentation*. ISO Standards.
- ISO 10137 (2007). *Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. ISO Standards.

- Kowalska-Koczwara, A. y Stypula, K (2016), *Assessment of the vibration influence on humans in buildings in the standards of different countries*, WMCAUS 2016, Procedia Engineering 161, pp 970-974.
- Lee, C. y Goverdovskiy, V. (2021). *Vibrations destroying human-machine systems inside and outside*. In *Vibration Protection Systems: Negative and quasi-zero stiffness*, pp. 1-24, Cambridge: Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108874540.003> .
- Montano Rodríguez W. A. (2025). *Ruido, vibraciones, higiene: proyecto de 1940 de Ponce de León, Carta al editor*, Rev Méd Urug 2025; 41(1): e902 <https://doi.org/10.29193/RMU.41.1.13>, Sindicato Médico del Uruguay. Open access bajo la licencia CC BY 4.0. Publicado en INDEX.
- NADF-004-AMBT-2004. *Norma ambiental para el Distrito Federal. Condiciones de medición y los límites máximos permisibles para vibraciones mecánicas*.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2010). *Ground-Borne Noise and Vibration in Buildings Caused by Rail Transit*. Washington, DC: The National Academies Press. Disponible en <https://doi.org/10.17226/22951>.
- NTC (2023). *Norma Técnica Complementaria sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones*. Reglamento De Construcción De La Ciudad De México.
- PAOT: Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. *Contaminación por ruido y vibraciones: implicaciones en la salud y calidad de vida de la población urbana*. Disponible en <https://paot.org.mx/centro/paot/ruido02-05.pdf>
- RIVAS Railway-Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative Project (2010). *Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration*. Deliverable D1.4, Submission date 12/01/2011. Work Package WP1: Assessment and monitoring procedures. Task T1.1: Assessment of human exposure. RIVAS SCP0-GA-2010-265754.
- Schiavi A. y Rossi L. (2015). *Vibration perception in buildings: a survey. From the historical origins to the present day*. 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015. Energy Procedia 78 2 – 7. Elsevier.
- Sovacool B. K. (2009). *Early modes of transport in the United States: Lessons for modern energy policymakers, Policy and Society*, Volumen 27, No. 4, Pags. 411–427, <https://doi.org/10.1016/j.polsoc.2009.01.006>.
- St. Clair D. J. (1981) *The Motorization and Decline of Urban Public Transit, 1935-1950*. The Journal of Economic History, Vol. 41, No. 3, pags. 579-600, Cambridge University Press en nombre de la Economic History Association Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/2119941>.
- U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration (2018). *Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual*. FTA Report No. 0123.