
ESTUDIO DE VIBRACIONES

APÉNDICE

4

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO.....	1
2. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA APLICABLE	1
2.1. NORMATIVA COMUNITARIA.....	1
2.2. NORMATIVA ESTATAL.....	1
2.3. NORMATIVA AUTONÓMICA	2
2.4. NORMATIVA LOCAL.....	2
2.5. NIVELES LÍMITE PARA LA DEFINICIÓN DE MEDIDAS PROTECTORAS	3
3. INVENTARIO DE FUENTES Y RECEPTORES.....	3
3.1. INVENTARIO DE FUENTES DE VIBRACIÓN.....	3
3.2. INVENTARIO DE RECEPTORES SENSIBLES	3
4. CAMPAÑA DE MEDICIONES EN LA SITUACIÓN ACTUAL	4
4.1. INTRODUCCIÓN.....	4
4.2. SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDIDA.....	4
4.3. CONDICIONES DE LA TOMA DE DATOS.....	6
4.4. EQUIPOS DE MEDIDA.....	6
4.5. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LAS MEDIDAS DE VIBRACIÓN ACTUAL.....	8
4.6. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL ACTUAL	9
4.7. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO	11
5. CÁLCULOS DE NIVELES EN LA SITUACIÓN FUTURA	13
5.1. METODOLOGÍA	13
5.2. EMISIÓN POR EL MATERIAL RODANTE	13
5.3. TRANSMISIÓN POR LA SUPERESTRUCTURA.....	13
5.4. TRANSMISIÓN POR EL TERRENO.....	14
5.5. VALIDACIÓN DEL MODELO EN LA SITUACIÓN ACTUAL	14
5.6. RECEPCIÓN EN EDIFICIOS.....	20
5.7. RESULTADOS EN SITUACIÓN FUTURA.....	21
6. MEDIDAS PROTECTORAS	22
7. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.....	22

ANEXO 1. PLANO DE RECEPTORES SENSIBLES Y PUNTOS DE MEDIDA

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO

El objeto del presente apéndice es el estudio de vibraciones en fase de explotación del estudio informativo de la Estación intermodal en el ámbito de Tarragona. Se analizarán dos alternativas con el fin de compararlas desde el punto de vista vibratorio.

Para ello se analiza toda la zona de actuación, es decir, las edificaciones que pudieran resultar expuestas en el futuro a niveles de vibraciones no deseables, prestando especial atención a las edificaciones actuales de uso residencial, que son las más sensibles en la zona.

El presente estudio de vibraciones está estructurado de la siguiente manera:

- Introducción
- Análisis de la normativa aplicable
- Inventario de fuentes y receptores
- Mediciones y niveles actuales
- Situación futura
- Medidas protectoras
- Conclusiones y síntesis del documento

Aunque se trate de un estudio informativo, el alcance y contenido de este estudio se ajusta lo máximo posible a lo especificado en las "Instrucciones y recomendaciones para redacción de proyectos de plataforma" de ADIF (PGP 2011)", y en particular, de la IGP 6.4. Estudio para la prevención de ruidos y vibraciones en fase de explotación.

2. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA APLICABLE

A continuación, se analizan las diferentes normativas aplicables en el tramo objeto de estudio que a diferentes niveles contengan valores límite para el estudio de afección por vibraciones que pudiera provocar el tráfico ferroviario.

2.1. NORMATIVA COMUNITARIA

No existe normativa europea aplicable a las vibraciones causadas por infraestructuras.

2.2. NORMATIVA ESTATAL

La transposición de la Directiva 2002/49/CE a la legislación estatal se realizó mediante la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, de Ruido (modificada parcialmente mediante el Real Decreto-Ley 8/2011, de 1 de julio).

Esta Ley dedica su Capítulo II a la Calidad Acústica y, más concretamente la Sección 1ª a las Áreas Acústicas. En el artículo 7.1 están definidos los tipos de áreas acústicas que, como mínimo, deben definir las comunidades autónomas en función del uso predominante del suelo. Por otro lado, en el artículo 7.2 se establece la competencia del Gobierno para definir los objetivos de calidad acústica en las áreas acústicas, así como en espacios interiores habitables.

La Ley de Ruido ha sido desarrollada reglamentariamente mediante dos disposiciones:

- En materia de evaluación y gestión del ruido ambiental, el Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre.
- En lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, el Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre.

El primero se centra, especialmente, en la evaluación estratégica de ruido, además de definir los índices acústicos, y métodos de cálculo y de evaluación para los mismos.

Entre los aspectos de mayor relevancia que interesan del segundo, el RD 1367/2007, de aplicación más directa al presente caso, destacarían los siguientes:

- La definición y aplicación de índices.
- La definición y delimitación de áreas y de objetivos de calidad.
- El establecimiento de valores límite inmisión originados por los emisores.
- Los procedimientos y métodos de evaluación.

En relación con los valores límite de vibración aplicables, el Art. 26 del RD 1367/2007 establece para los nuevos emisores acústicos relacionados en el artículo 12.2 de la Ley 37/2003, entre los que se encuentran los ferrocarriles, "deberán adoptar las medidas necesarias para no transmitir al espacio interior de las edificaciones destinadas a vivienda, usos residenciales, hospitalarios, educativos o culturales, vibraciones que contribuyan a superar los objetivos de calidad acústica para vibraciones que les sean de aplicación de acuerdo con el artículo 16, evaluadas conforme al procedimiento establecido en el anexo IV".

Para vibraciones transitorias con más de 9 eventos al día, como es el caso aquí, dichos valores se encuentran en la Tabla C del Anexo II del R.D., en relación con el uso del edificio afectado:

Tabla C. Objetivos de calidad acústica para vibraciones aplicables al espacio interior habitable de edificaciones destinadas a vivienda, usos residenciales, hospitalarios, educativos o culturales.

Uso del edificio	Índice de vibración L_{3w}
Vivienda o uso residencial	75
Hospitalario	72
Educativo o cultural	72

2.3. NORMATIVA AUTONÓMICA

El Estatuto de Autonomía de Cataluña prevé, en el artículo 144.1.h, la competencia de la Generalitat de Catalunya para establecer la regulación del ambiente atmosférico y de las diversas clases de contaminación de éste, incluida, por lo tanto, la contaminación acústica y vibratoria.

En este sentido se han desarrollado la Ley 16/2002, de 28 de junio, de protección contra la contaminación acústica (DOGC 3675 con fecha 11 de Julio de 2002), y el Decreto 245/2005, de 8 de noviembre, por el que se fijan los criterios para la elaboración de los mapas de capacidad acústica, en el marco de la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.

Posteriormente, a nivel estatal, la promulgación de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, del Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, que la desarrolla con respecto a la evaluación y gestión del ruido ambiental y del Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, que la desarrolla con respecto a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, comportan la necesidad de proceder a la introducción de aquellos ajustes necesarios para restablecer la interrelación y la coherencia entre ambos sistemas normativos.

El decreto 176/2009, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 16/2002, de 28 de junio, de protección contra la contaminación acústica de la Generalitat de Cataluña (DOGC 5506 de 16/11/2009), y se adaptan sus anexos, tiene por objeto prevenir y corregir la contaminación acústica, que afecta a los ciudadanos y al medio ambiente, provocada por los ruidos y vibraciones, y al mismo tiempo establecer un régimen de intervención administrativa que sea de aplicación en todo el territorio de Cataluña.

Queda sometida a la presente legislación cualquier infraestructura que origine ruidos y vibraciones.

De acuerdo con el Anexo 7 de esta legislación, en ningún caso podrán superarse los niveles límite de vibraciones transitorias con más de 9 eventos diarios indicados en la tabla siguiente:

USO DEL EDIFICIO	VALORES LÍMITE DE INMISIÓN L_{3w} (dB)
Vivienda o uso residencial	75
Hospitalario	72
Educativo o cultural	72

2.4. NORMATIVA LOCAL

En el ámbito local, el proyecto discurre por los términos municipales de Reus y Vilaseca.

No consta que Ayuntamiento de Vilaseca cuente con una ordenanza de protección contra las vibraciones, pero el de Reus sí tiene una ordenanza reguladora del ruido y las vibraciones, de 13/09/2021, en el que se indican en su anexo 5 los mismos límites que el Real Decreto 1367/2007 y el Decreto autonómico 176/2009:

USO DEL EDIFICIO	VALORES LÍMITE DE INMISIÓN Law (dB)
Vivienda o uso residencial	75
Hospitalario	72
Educativo o cultural	72

2.5. NIVELES LÍMITE PARA LA DEFINICIÓN DE MEDIDAS PROTECTORAS

Dado que aún no existe Declaración de Impacto Ambiental, del análisis normativo realizado se concluye que son de aplicación los límites comunes al Real Decreto 1367/2007, al Decreto autonómico 176/2009 y a la ordenanza de Reus, es decir, a lo largo de todo el trazado:

USO DEL EDIFICIO	VALORES LÍMITE DE INMISIÓN Law (dB)
Vivienda o uso residencial	75
Hospitalario	72
Educativo o cultural	72

No obstante, aunque no es de aplicación y no se tendrá en cuenta para el diseño de posibles medidas protectoras, también se analizará a modo puramente informativo el índice K, ya que, al dar información en frecuencia, resulta complementario, con los siguientes valores límite basados en la norma ISO 2631-2:1989 para vibraciones intermitentes o continuas en horario nocturno:

USO DEL EDIFICIO	ÍNDICE DE VIBRACIÓN LÍMITE K
Crítico (sanitario, cultural, laboratorios, etc.)	1
Residencial	1,4
Oficinas	4
Talleres	8

3. INVENTARIO DE FUENTES Y RECEPTORES

3.1. INVENTARIO DE FUENTES DE VIBRACIÓN

Aunque pueda existir cierta vibración debida al tráfico rodado en algunos sitios, o incluso por actividad agroindustrial, se considera que, en la zona de actuación, las únicas fuentes relevantes de vibraciones procederían de las siguientes líneas ferroviarias:

- Línea 600 de vía doble en trinchera, Corredor Mediterráneo.
- Línea 210 de vía doble a cota de terreno Miraflores - Tarragona.
- Ramal de acceso directo de Valencia a Vilaseca.
- Tren-Tranvía del Camp de Tarragona.

3.2. INVENTARIO DE RECEPTORES SENSIBLES

Se realiza un inventario de la situación en el entorno, centrándose en la identificación de las edificaciones y zonas sensibles existentes a lo largo del trazado.

En la siguiente tabla se identifican las edificaciones encontradas a menos de 70 m de la traza en planta (2D).

ID	MUNICIPIO	USO	ESTADO	Nº PLANTAS	MARGEN	DISTANCIA 2D ALT1 (M)	DISTANCIA 3D ALT1 (M)	DISTANCIA 2D ALT2 (M)	DISTANCIA 3D ALT2 (M)	ESTUDIO VIBRACIONES
9	Vila-Seca	Residencial	En uso	1	Derecha	52	53	52	53	SI
10	Vila-Seca	Otros	En uso	1	Izquierda	30	31	30	31	NO
11	Vila-Seca	Residencial	En uso	1	Derecha	45	45	44	44	SI
12	Vila-Seca	Infraestructura	En uso	1	Derecha	16	16	11	12	NO
13	Vila-Seca	Otros	En uso	1	Derecha	51	51	46	46	NO
14	Vila-Seca	Residencial	En uso	1	Izquierda	61	61	56	56	SI
15	Vila-Seca	Otros	En uso	1	Izquierda	59	59	54	54	NO
18	Vila-Seca	Otros	En uso	1	Derecha	28	29	23	24	NO
23	Vila-Seca	Otros	En uso	1	Derecha	38	39	33	34	NO
30	Reus	Industrial	En uso	1	Izquierda	58	59	58	59	NO
32	Reus	Industrial	En uso	2	Izquierda	50	50	50	50	NO
33	Reus	Otros	En uso	1	Derecha	54	54	54	54	NO
34	Reus	Otros	En uso	1	Derecha	63	63	63	63	NO
36	Reus	Infraestructura	En uso	1	Izquierda	27	27	27	27	NO
38	Reus	Infraestructura	En uso	1	Izquierda	27	27	27	27	NO
39	Reus	Infraestructura	En uso	1	Izquierda	26	26	26	26	NO

4. CAMPAÑA DE MEDICIONES EN LA SITUACIÓN ACTUAL

4.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de la campaña de mediciones es doble: determinar los niveles vibratorios actuales y validar el modelo de cálculo de los niveles previsibles en la situación futura, sobre todo en relación con la transmisión del terreno.

En cuanto a la determinación de los niveles actuales, no se trata estrictamente de verificar el cumplimiento de la legislación, ya que no se mide en viviendas según todos los procedimientos descritos en los textos legislativos, sino de dar una idea sobre el impacto vibratorio de las líneas ferroviarias presentes en la actualidad.

En cuanto a la caracterización de los terrenos, se determina su atenuación a fin de validar el posterior modelo de propagación de la vibración desde la superestructura a los diferentes puntos de interés.

4.2. SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDIDA

El primer criterio de elección de puntos de medida se basa en considerar, a lo largo de todo el trazado, las localizaciones donde existen construcciones sensibles que pueden sufrir niveles de vibraciones relevantes en la actualidad, teniendo en cuenta las fuentes actuales y representando los momentos de intensidades más representativas.

El segundo criterio consiste en medir en puntos representativos de los terrenos presentes en el entorno del futuro trazado.

En este caso, el perfil geotécnico se puede considerar uniforme, con arcillas y arenas con cantos.

También se tienen en cuenta las facilidades de accesos y obstáculos existentes (propiedades privadas, calles, vallas, obras, terrenos labrados, etc.) y las posibilidades de colocar varios puntos de medida a varias distancias para poder determinar la atenuación vibratoria en función de la distancia.

Finalmente, se seleccionaron 3 puntos de medida:

PUNTO DE MEDICIÓN	MOTIVO DE LA SELECCIÓN
PMV1	Cerca de los edificios 11, 9 y 12
PMV2	Cerca de los edificios 14 y 15
PMV3	Cerca de los edificios 33 y 34.

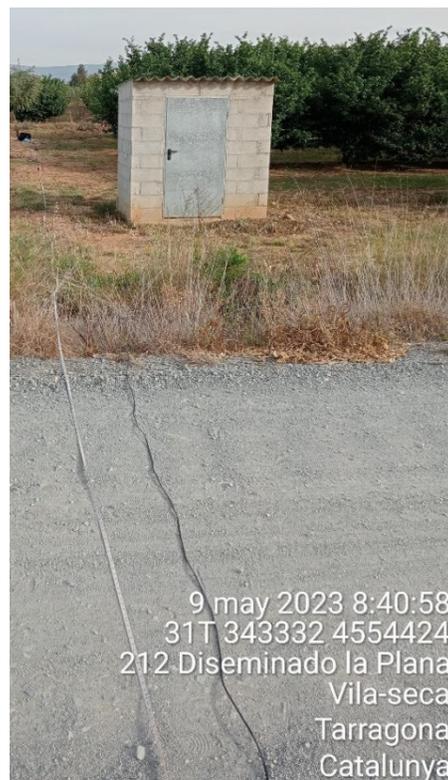
En el plano anexo, se muestra la ubicación de estos puntos de medida y a continuación, se muestran unas fotos:



PMV1



PMV3



PMV2

En cada localización se determinaron los niveles actuales triaxiales sobre disco de medida lo más cerca posible de la línea de fachada de los edificios y al tratarse, en el caso de medidas de vibraciones, de evaluar el momento de mayor intensidad y no una integración de niveles durante un periodo como en el caso de las medidas de ruido, no se consideraron necesarias medidas de larga duración ni en diferentes periodos (día, tarde, noche). Consecuentemente, se realizaron varias medidas con paso de trenes de diferentes tipos a diferentes velocidades y en diferentes direcciones.

En las mismas ubicaciones, también se midió la transmisibilidad a través del terreno con varios acelerómetros monoaxiales, registrando simultáneamente a la vibración ambiental con acelerómetro triaxial, la aceleración a varias distancias de las vías actuales

4.3. CONDICIONES DE LA TOMA DE DATOS

Las mediciones se realizaron el martes 9 de mayo de 2023.

La metodología de medida y representación de datos se basa en las especificaciones de la Norma ISO 2631-2, de 'Evaluación de la exposición humana a la vibración en cuerpo completo. Parte 2: Vibración continua e inducida por impacto en edificios (1 a 80 Hz)'.

También se consideraron las directrices del Real Decreto 1367/2007, del Decreto 176/2009, de la ordenanza municipal de Reus, así como las siguientes precauciones:

- Se verificó la calibración de la cadena de medida antes y después de las mediciones.
- Los acelerómetros se colocaron en soportes horizontales y se hizo coincidir la vibración en el eje vertical con la dirección de máxima sensibilidad de los acelerómetros.
- Los acelerómetros se colocaron en la acera de forma que la unión con la superficie de vibración sea lo más rígida posible, con disco de medida, piquetas, cianocrilato y/o cera.
- En todo momento, se evitó el movimiento del cable de conexión del acelerómetro al analizador de frecuencias. Asimismo, el técnico se situó a

más de 2 metros de distancia durante la medida para evitar influencias por su presencia.

- Las condiciones meteorológicas eran normales, sin fenómenos atmosféricos destacables (lluvia, granizo, etc.) que pudieran influir en los resultados de la medida, ni existencia de otras fuentes temporales que pudieran aportar información errónea sobre los niveles habitualmente existentes en la zona (obras en la vía pública, operaciones de carga y descarga, etc.).

4.4. EQUIPOS DE MEDIDA

El instrumento de medida utilizado para garantizar la calidad de las medidas de vibraciones tanto para para las medidas de la vibración ambiental actual como para las medidas de caracterización del terreno es el analizador Svantek SV106, con nº de serie 45050.

Para las mediciones de vibración ambiental actual, se le conectó un acelerómetro triaxial Svantek modelo SV84, con nº de serie D2294, sobre disco de medida y para las medidas de transmisibilidad de los terrenos, se añadieron tres acelerómetros monoaxiales PCB modelo 393B12, con nº de serie 34051, 55157 y 55158. En los sitios con terreno blando, estos acelerómetros monoaxiales se fijan sobre pernos que se anclan en el suelo.

El calibrador utilizado fue el Svantek SV111, con nº serie 30590.

Se utilizan otros accesorios como medidores de distancia, velocidad, etc.

A continuación, se muestran los certificados de los principales equipos de medida utilizados:



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Certificate of calibration

Número
Number 21/34524125

Página 1 de 3 páginas
Page of pages

Los puntos con * no están amparados por la marca ENAC

Applus⁺

Metrología

LGAI Technological Center, S.A.

Campus UAB
08193 Bellaterra
T +34 93 567 20 50
F +34 93 567 20 01
metrologia@appluscorp.com
www.applus.com

OBJET
Item

Medidor de vibración para edificios

IDENTIFICACIÓN
Identification

	Medidor	Acelerómetro
Marca / Mark	SVANTEK	SVANTEK
Modelo / Model	SV106	SV84
Nº serie / Serial Nº	45050	D2294

SOLICITANTE
Applicant

ACUSTICA Y TELECOMUNICACIONES, S.L.
Pol. Ind. Benieto - c/del Transporte, 12
46702 GANDIA
VALENCIA

FECHA/S DE CALIBRACIÓN
Date/s of calibration

2021-05-14

SIGNATARIO/S
Authorized signatory/ies

Responsable Técnico / Technical Manager

Técnico / Technician

JORDI GIL DEL RIO 14/05/2021 15:23:24
Código Seguro de Verificación (CSV): 004450737N4CB

Eusebi Ruiz Solà
14/05/2021 13:05:09

Este documento ha sido firmado electrónicamente según la Ley 59/2003 e identificado mediante un Código Seguro de Verificación (CSV).
Consulte la validez del documento en el servicio Web de verificación <https://apps.applus.com/firmaws/>

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedidas por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales.
ENAC es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MLA) de certificados de calibración de European Cooperation for Accreditation (EA) y de International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).
Este certificado no podrá ser reproducido parcialmente, excepto cuando se haya obtenido previamente permiso por escrito de Applus.

This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national standards.
ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).
This Certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of Applus.



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Certificate of calibration

Número
Number 00507106M1

Página 1 de 3 páginas
Page of pages

Los puntos con * no están amparados por la marca ENAC

Applus⁺

Metrología

LGAI Technological Center, S.A.

Campus UAB
08193 Bellaterra
T +34 93 567 20 50
F +34 93 567 20 01
metrologia@appluscorp.com
www.applus.com

OBJET
Item

Medidor de vibración para edificios

IDENTIFICACIÓN
Identification

	Medidor	Acelerómetros
Marca / Mark	SVANTEK	PCB
Modelo / Model	SV106	393B12
Nº serie / Serial Nº	45050	34051 rojo (X) 55158 verde (Y) 55157 azul (Z)

SOLICITANTE
Applicant

ACUSTICA Y TELECOMUNICACIONES, S.L.
POL. IND. BENEITO, C/DEL TRANSPORT
46702 GANDIA
VALENCIA

FECHA/S DE CALIBRACIÓN
Date/s of calibration

2022-02-11

SIGNATARIO/S
Authorized signatory/ies

Responsable Técnico / Technical Manager

Técnico / Technician

Juanjo Sanz 25/02/2022 10:15:11
Código Seguro de Verificación (CSV): 76960923513GV

Eusebi Ruiz Solà
23/02/2022 16:02:27

Este documento ha sido firmado electrónicamente según la Ley 59/2003 e identificado mediante un Código Seguro de Verificación (CSV).
Consulte la validez del documento en el servicio Web de verificación <https://apps.applus.solutions/metrosign/>

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedidas por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales.
ENAC es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MLA) de certificados de calibración de European Cooperation for Accreditation (EA) y de International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).
Este certificado no podrá ser reproducido parcialmente, excepto cuando se haya obtenido previamente permiso por escrito de Applus.

This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national standards.
ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).
This Certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of Applus.



Commande : Bon pour accord du devis n° DEV2208684-V2 du 27/07/2022

CERTIFICAT D'ETALONNAGE

N° P224692/2

DELIVRE A : **ACUSTICA Y TELECOMUNICACIONES S.L.**
Pol. Ind. Benieto
C/ del Transporte n°12
46702 GANDIA
España

INSTRUMENT ETALONNE

Désignation : **CALIBREUR ACCELEROMETRIQUE**

Constructeur : **Svantek**

Type : **SV111** N° de série : **30590**
N° d'identification : **EQ-ACUS-47**

Ce certificat comprend **4 pages** Date d'émission : **12 août 2022**

Le Responsable Technique
de l'activité Vibration

Adrien CANU



Accréditation
N° 2.60
Portée disponible
Sur www.cofrac.fr

Certaines prestations rapportées dans ce document ne sont pas couvertes par l'accréditation.
Elles sont identifiées par le symbole **.

La reproduction de ce certificat n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral
This certificate may not be reproduced other than in full by photographic process

Laboratoire national de métrologie et d'essais • Établissement public à caractère industriel et commercial
Siège social : 1, rue Gaston Boissier 75724 Paris Cedex 15 • Tél. : 01 40 43 37 00 • Fax : 01 40 43 37 37
info@lne.fr • lne.fr • RCS Paris 313 320 244 • NAF : 7120B • TVA : FR 92 313 320 244

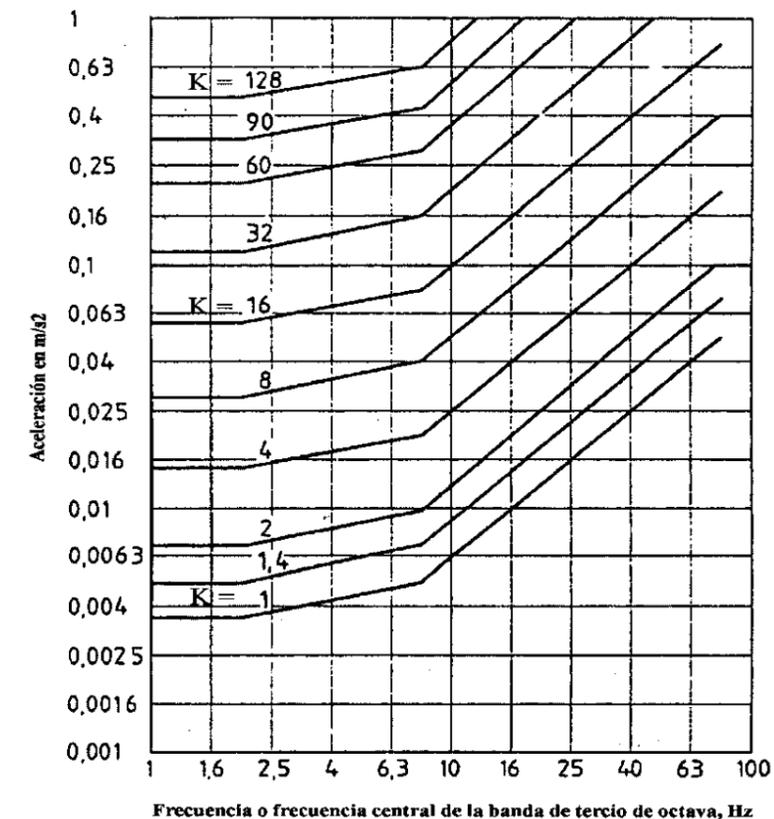
4.5. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LAS MEDIDAS DE VIBRACIÓN ACTUAL

A partir de los espectros lineales (sin ponderación) medidos de la señal de aceleración triaxial en m/s^2 obtenidos mediante promediado exponencial con constante temporal de 1 s, se determina el índice de vibración L_{aw} , en dB, con la siguiente expresión:

$$L_{aw} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{a_w}{a_0} \right),$$

Donde $a_0 = 10^{-6} m/s^2$ es la aceleración de referencia y a_w , el máximo del valor eficaz (RMS) de la señal de aceleración, obtenido mediante promediado exponencial con constante temporal de 1 s, con ponderación en frecuencia w_m según definido en la norma ISO 2631 (parámetro MTVV).

Por su parte, el índice de vibración K se determina a modo informativo utilizando la gráfica siguiente (o las expresiones matemáticas correspondientes):



4.6. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL ACTUAL

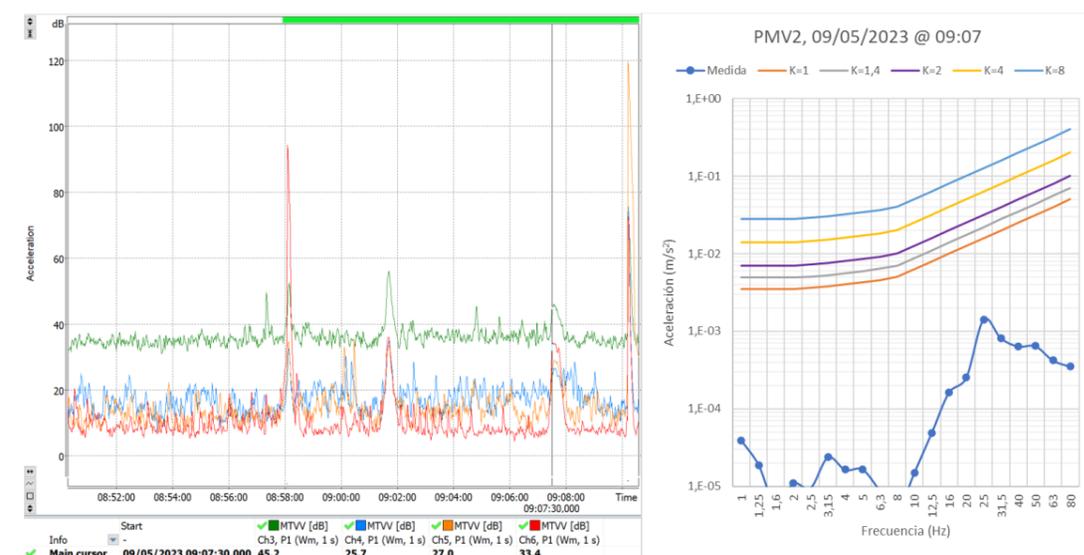
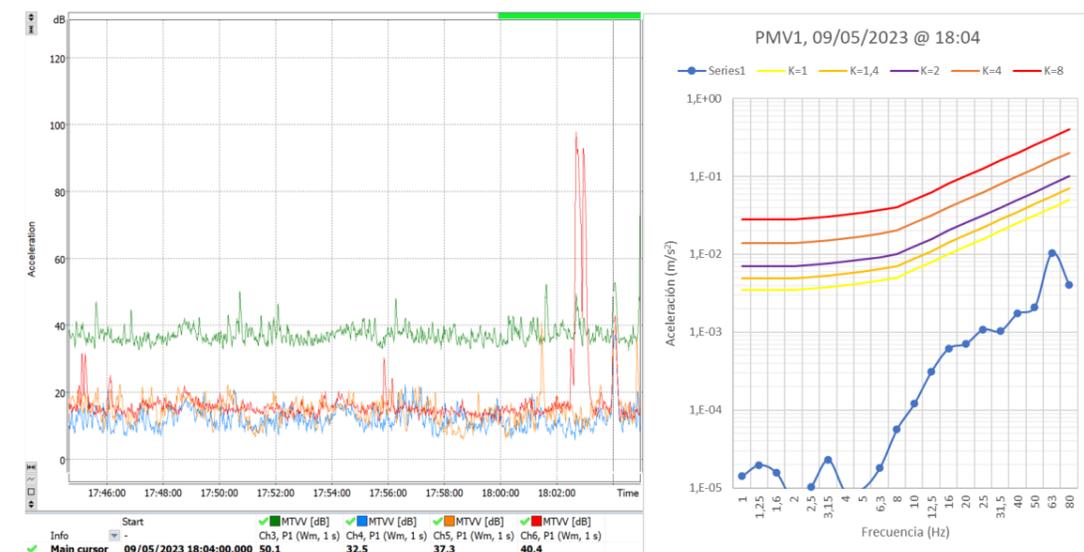
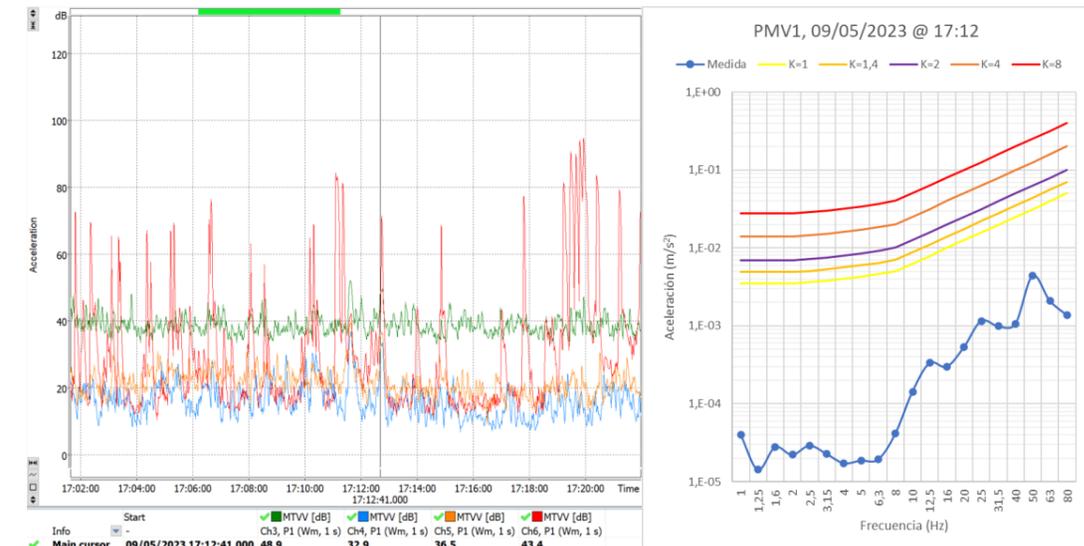
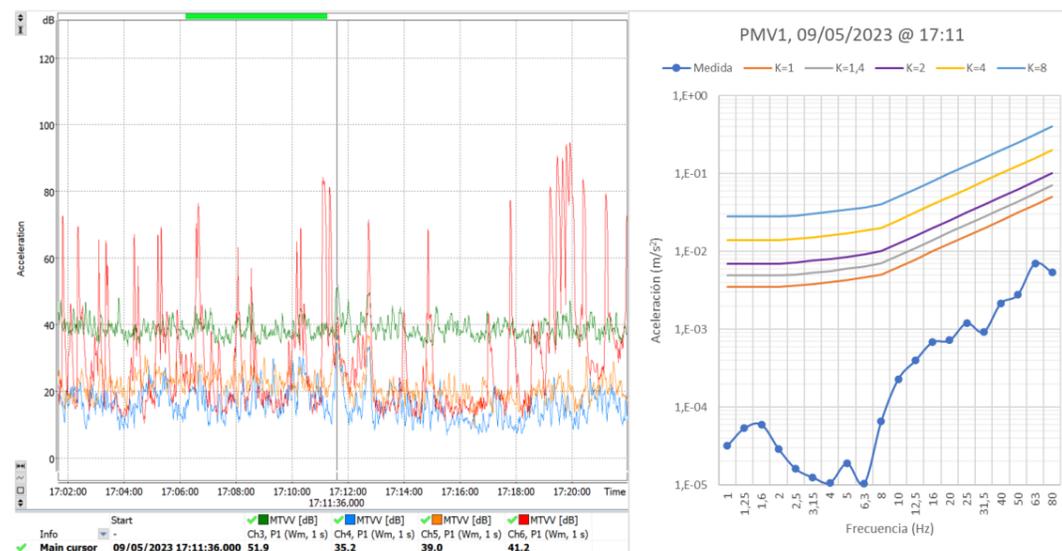
En la tabla siguiente, se detalla el índice Law de evaluación de vibraciones en disco de medida aproximadamente en las líneas de fachada de los edificios con paso de trenes en las vías actuales. También se indica el índice K para dar información en frecuencia.

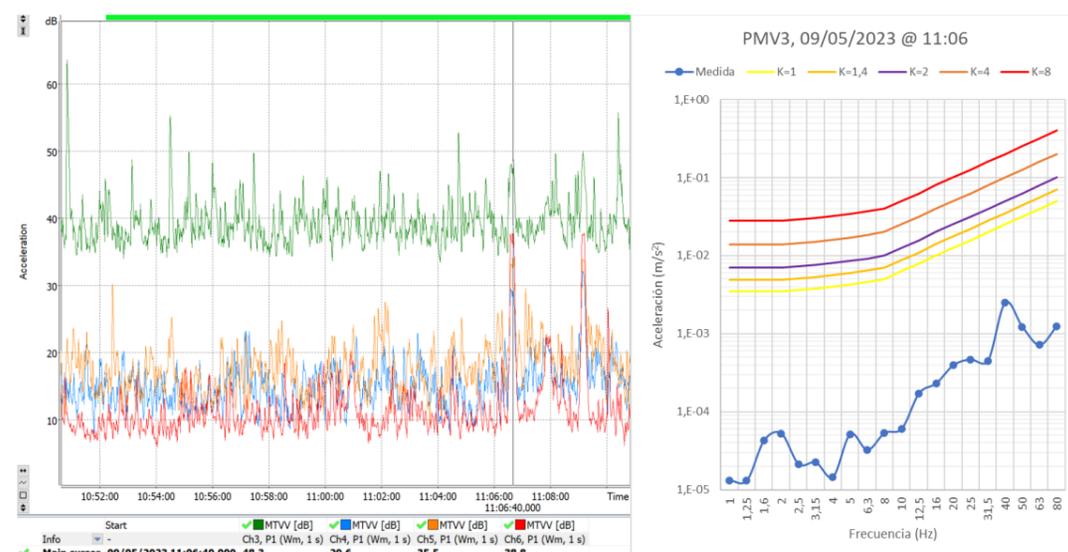
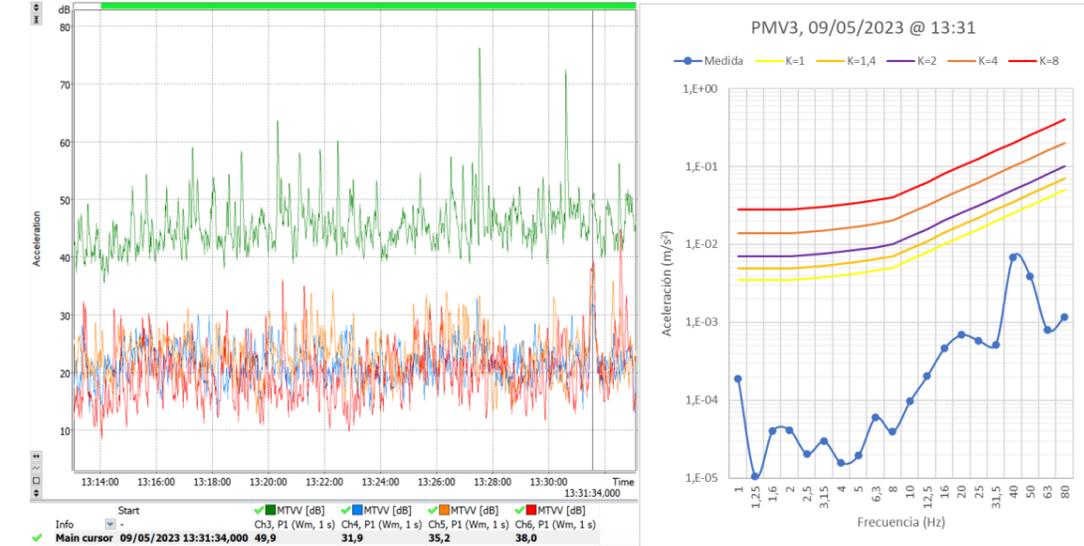
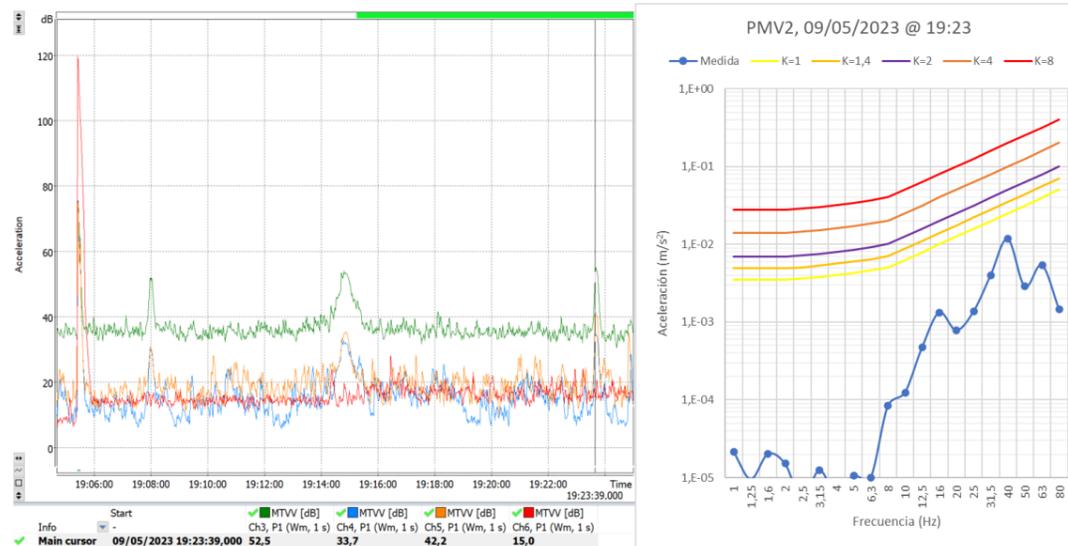
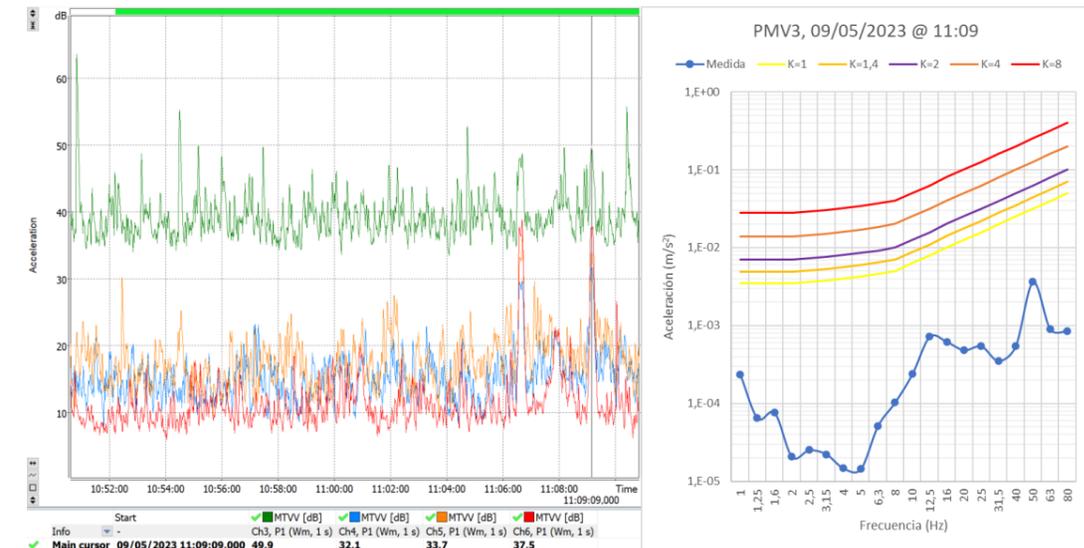
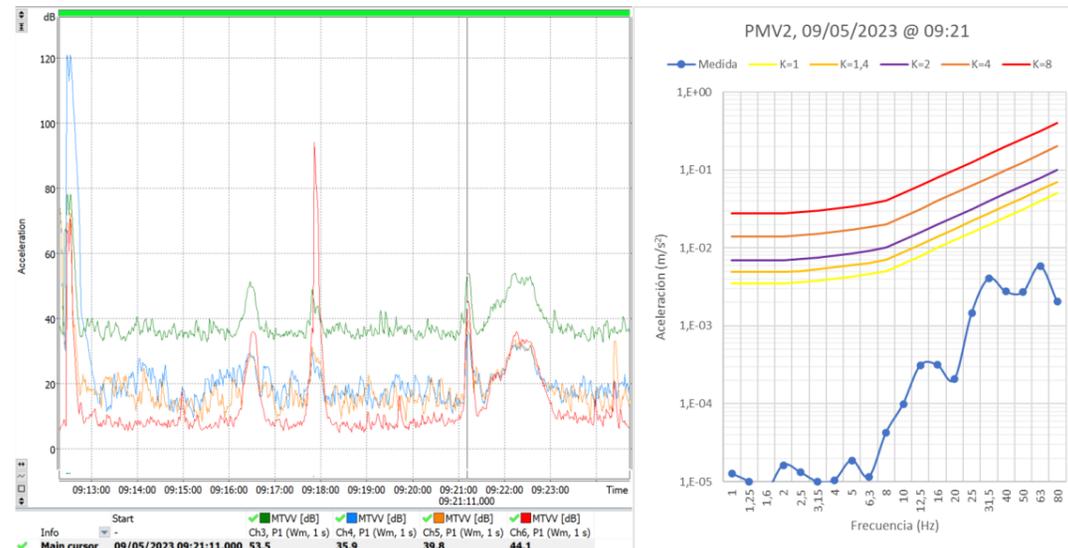
No existe una correspondencia real entre estos dos índices, aunque de forma aproximativa, en el caso de una única frecuencia claramente predominante, un K de 1.0 se corresponde a un Law (algo más restrictivo) de 72 dB.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con circulaciones en la línea 600 (corredor mediterráneo):

PUNTO DE MEDIDA	DISTANCIA A LA VÍA (M)	HORA	COMPOSICIÓN	VELOCIDAD (KM/H)	SENTIDO	Law (dB)	K (FRECUENCIA)
PMV1	48	17:11	Serie 130 (13 coches)	110	Castellón	59,4	0,18 (63 Hz)
	52	17:12	Serie 130 (13 coches)	85	Barcelona	56,5	0,14 (50 Hz)
	52	18:04	Serie 130 (13 coches)	110	Barcelona	60,5	0,26 (63 Hz)
PMV2	60	09:07	Serie 130 (13 coches)	50	Castellón	51,6	0,09 (25 Hz)
	60	09:21	Serie 120 (4 coches)	110	Castellón	60,6	0,21 (31,5 Hz)
PMV3	48	11:06	Serie 130 (13 coches)	65	Castellón	53,0	0,10 (40 Hz)
	48	11:09	Serie 130 (13 coches)	80	Castellón	56,1	0,12 (50 Hz)
	52	13:31	Serie 130 (13 coches)	70	Barcelona	60,9	0,27 (40 Hz)

A continuación, se muestran para el paso de todos los trenes en todos los puntos de medida los extractos de registros temporales del parámetro MTVV en el eje vertical y los espectros triaxiales sin ponderar en la línea de fachada de los edificios, aproximadamente, comparados, a modo informativo, con las curvas del índice K:





Las mediciones no se han realizado en el interior de los edificios según todos los procedimientos descritos en los textos legislativos, sino en el exterior de éstos, con el principal objetivo de obtener información de los niveles “ambientales” a nivel de suelo.

No obstante, se pueden comparar los niveles obtenidos con los exigidos en la legislación, a fin de dar una idea de la situación vibratoria actual en la zona.

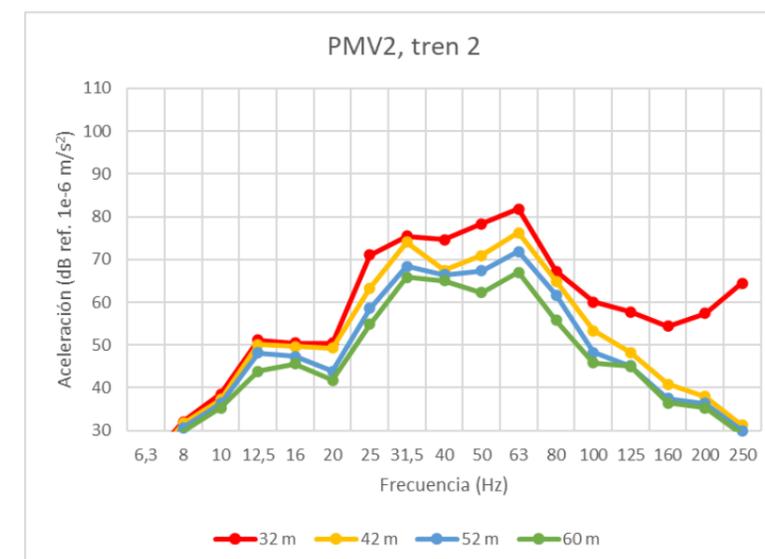
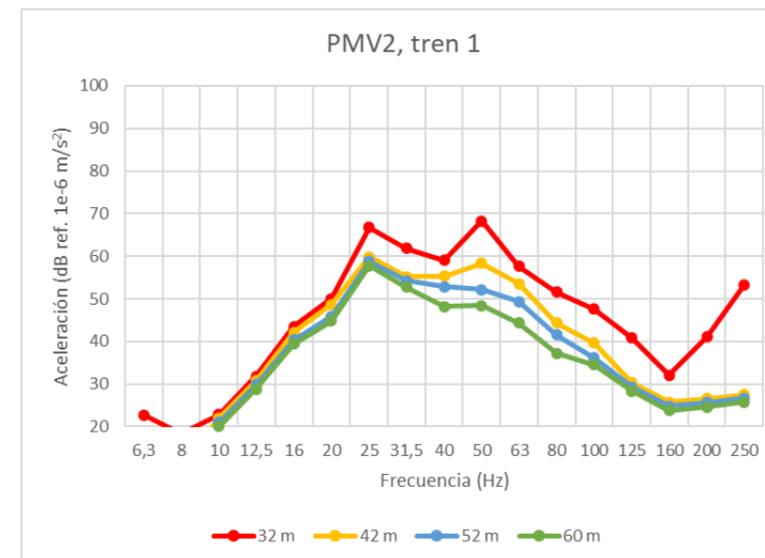
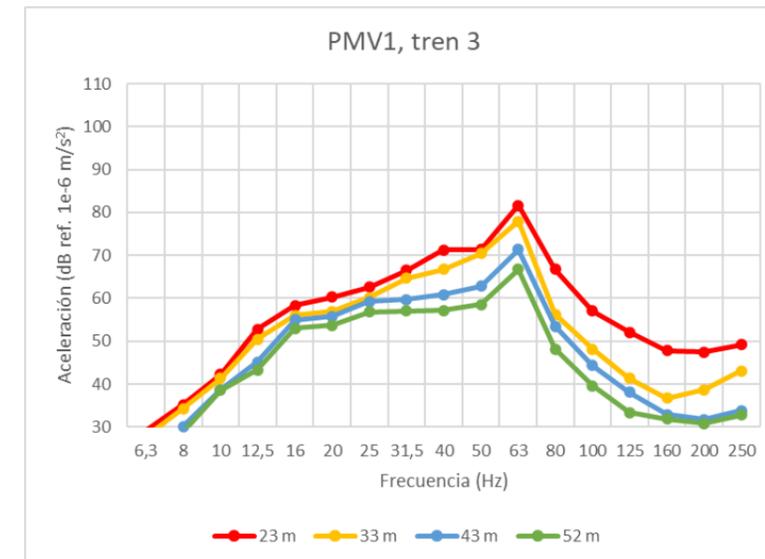
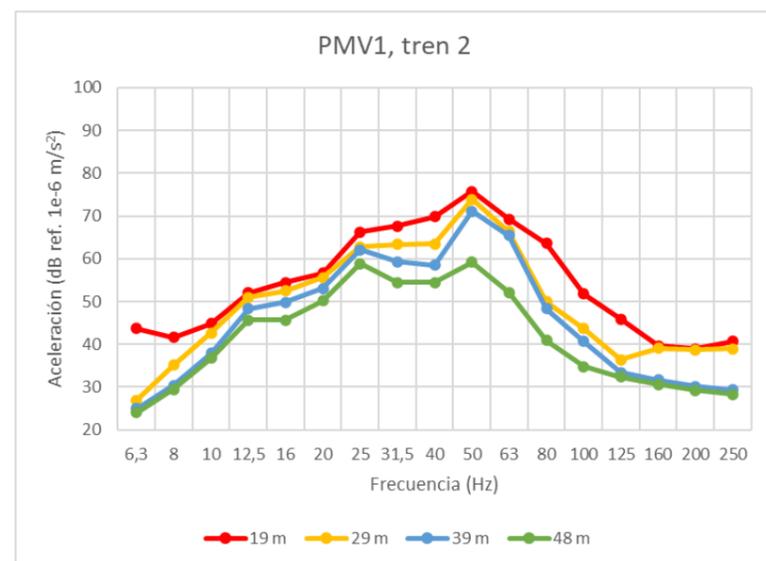
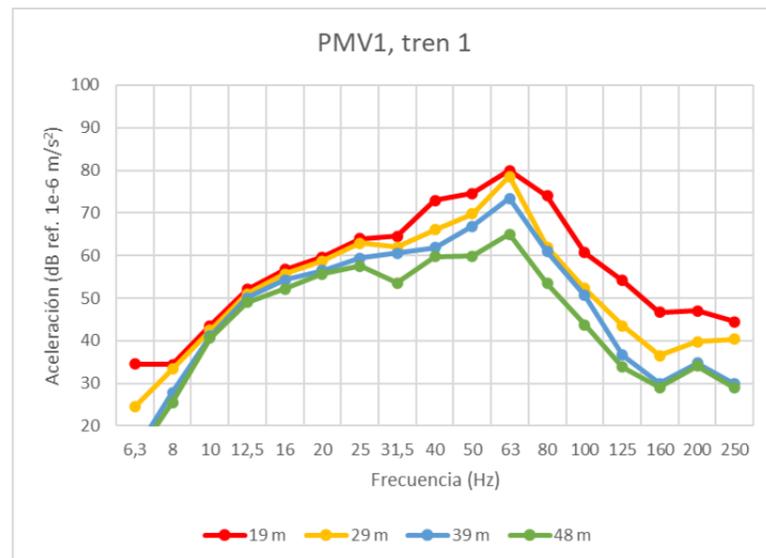
Del análisis de los resultados de las mediciones de vibración realizadas, se concluye que, en los tres puntos de medida, en las líneas de fachada de los edificios, es decir entre 48 y 60 m del eje de la vía de paso en este caso, se obtienen niveles significativamente (más de 9 dB) inferiores a los límites.

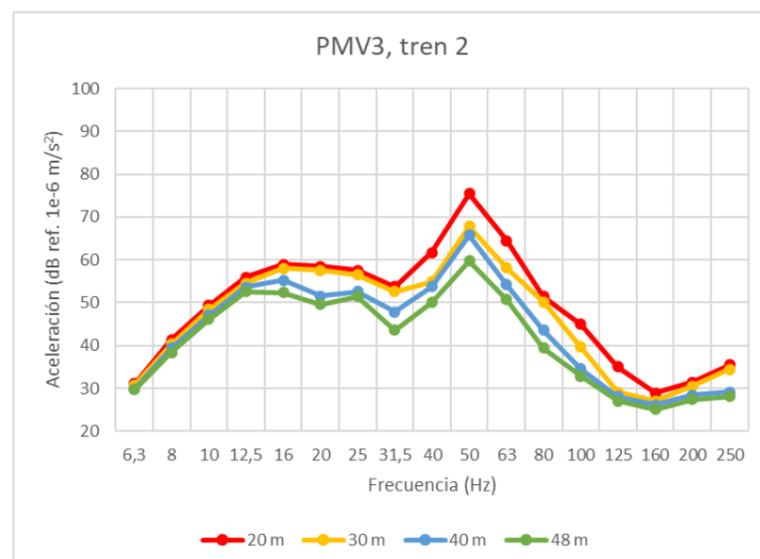
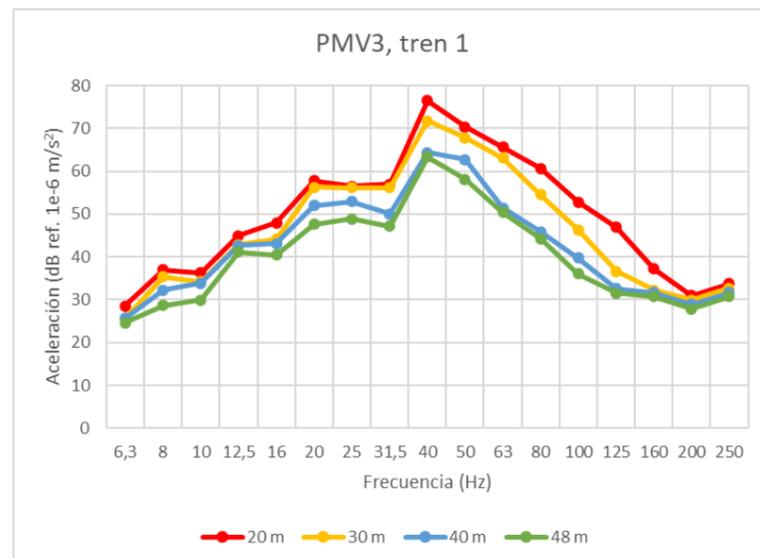
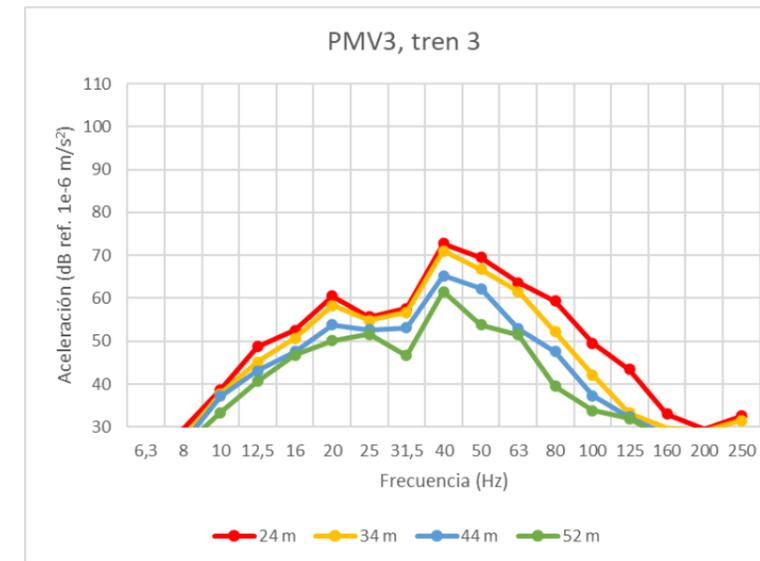
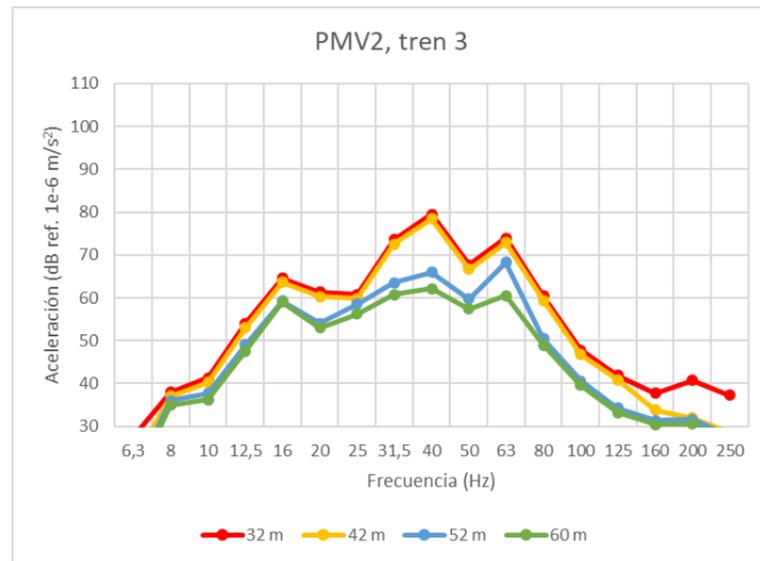
No se observa una influencia relevante del sentido de circulación y los niveles más relevantes se registran en las bandas de tercio de octava comprendidas entre 25 y 63 Hz.

4.7. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO

Como se ha descrito anteriormente, la transmisibilidad de los terrenos se ha determinado a partir de las vibraciones verticales registradas en tercio de octava con varios acelerómetros colocados a diferentes distancias de las vías entre 19 y 60 m.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos experimentalmente:





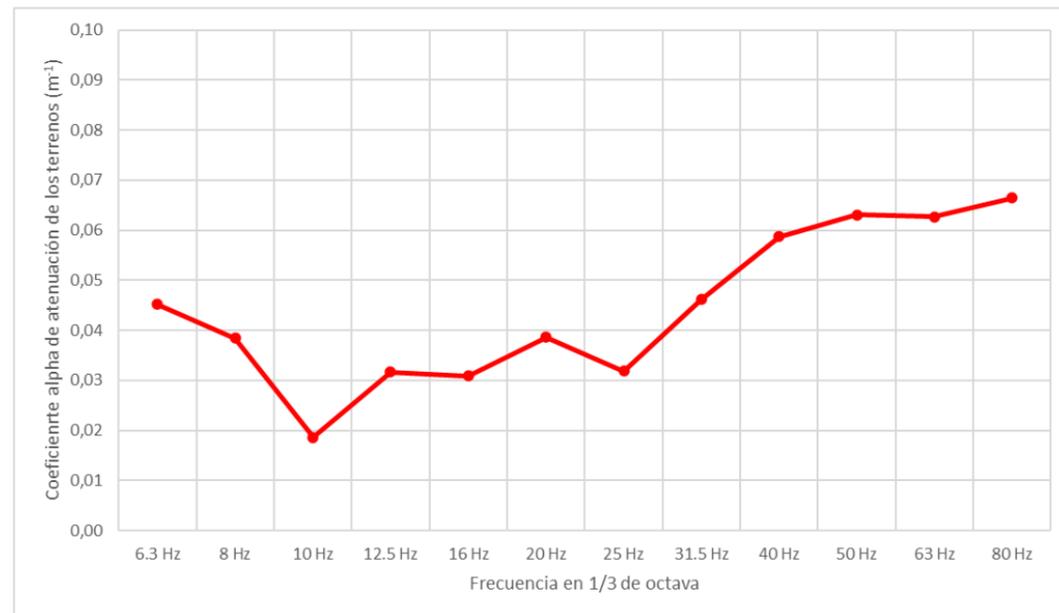
De estos resultados, se deducen las atenuaciones medias en cada banda de tercio de octava para su uso posterior en el modelo de simulación de la situación futura. Para ello, se validan las curvas teóricas del modelo de Barkan empleadas para la caracterización del terreno, es decir, que, asumiendo el cumplimiento de la Ley de Barkan de transmisión de vibraciones en el terreno, se procede al ajuste empírico de los resultados experimentales obtenidos según la citada Ley, enunciada a continuación:

$$v(d) = v(d_0) * \left(\frac{d_0}{d}\right)^\gamma * e^{\alpha(d_0-d)},$$

donde:

- $v(d)$ es la vibración transmitida a una distancia d de la fuente.
- $v(d_0)$ es la vibración transmitida a una distancia d_0 de la fuente.
- γ es la atenuación geométrica del terreno (considerado homogéneo, isotrópico y linealmente viscoelástico). En este caso, al tratarse de una fuente lineal en superficie, se considera nulo.
- α es la atenuación debida a la disipación de energía por el terreno, que se determina aquí experimentalmente.

La figura siguiente muestra los valores medios del coeficiente de atenuación obtenido y que se utilizarán en los cálculos:



5. CÁLCULOS DE NIVELES EN LA SITUACIÓN FUTURA

5.1. METODOLOGÍA

Los cálculos están basados en un método analítico validado previamente, y en numerosas ocasiones, por comparación con otros métodos numéricos (Elementos Finitos) y con mediciones. Para ello, se determinan (mediante documentación técnica aportada, mediciones y/o experiencia previa) las características asumibles que describan el problema: propiedades de material rodante, velocidad, superestructura, terreno y edificios. No obstante, en este caso, antes de simular la situación futura, también se podrá validar específicamente el modelo con las mediciones realizadas ahora en la situación actual.

5.2. EMISIÓN POR EL MATERIAL RODANTE

Se estima inicialmente la fuente de excitación por parte del material móvil mediante el método del impacto equivalente de Eisenmann, es decir, que se calcula la fuerza ejercida sobre los carriles por las ruedas de los ejes de los bogies, del material rodante presente en el escenario de circulación considerando una distribución uniforme en el contacto rueda/carril en la que se representan como un cilindro y un plano, respectivamente.

Además, de acuerdo con el modelo de Eisenmann adaptado por DB (Deutsche Bahn) para trenes de pasajeros, el factor de amplificación dinámica FAD se calcula en este caso en función de la velocidad V en km/h como:

$$FAD = 1 + t\varphi \left(1 + \frac{V-60}{380} \right),$$

donde $t = 2$ es un factor correspondiente a un intervalo de confianza medio de 95,5% y $\varphi = 0,2$ un factor correspondiente a un estado de vía bueno.

Para los cálculos, se consideran entonces los tipos de trenes más desfavorables previstos en el escenario de circulación a su máxima velocidad de proyecto, en este caso 220 km/h para los trenes sin parada. Así, tanto en la situación actual como en la futura, se trata entonces de circulaciones de trenes de Larga Distancia, con la diferencia de que, en la situación actual, circula la Serie 130, mientras que en la futura se prevé que circulen de la Serie 103.

Por lo tanto, dada la similitud entre ambas Series, tanto en la situación actual como en la futura, se consideran los siguientes datos desde el lado de la seguridad:

- Carga por eje: 17,5 kN
- Masa no suspendida: 990 kg por rueda
- Distancias entre ejes: 2,8/14,9 m
- Diámetro de rueda: 0,92 m

5.3. TRANSMISIÓN POR LA SUPERESTRUCTURA

A continuación, se consideran las masas, las rigideces y los factores de pérdida de todos los elementos que componen las superestructuras de vías (carriles, fijaciones, lecho, etc.), con el objetivo de determinar, mediante expresión analítica con el método de Zimmermann-Timoshenko, la respuesta de este sistema masa-muelle con un solo grado de libertad a la fuerza excitadora calculada anteriormente.

La vía actual es sobre balasto, seguirá sobre balasto en el futuro y se considera entonces, tanto para la situación actual como para la futura, fijaciones estándares de rigidez dinámica 150 kN/mm con traviesas monobloque de hormigón pretensado.

En el caso de estructuras, como andenes, etc., no se tendrá en cuenta su masa ni su contribución, por lo que se mantendrá del lado de la seguridad. Se tendrán en cuenta indirectamente, en el caso de las trincheras y terraplenes, por ejemplo, a través de la distancia 3D, es decir, de la diferencia de cota entre vía y terreno.

5.4. TRANSMISIÓN POR EL TERRENO

En este caso, se tiene en cuenta el coeficiente de atenuación del terreno determinado con las mediciones.

La transmisión en el terreno de las ondas vibratorias se ajusta entonces al modelo de Barkan descrito antes:

$$v(d) = v(d_0) * \left(\frac{d_0}{d}\right)^\gamma * e^{\alpha(d_0-d)},$$

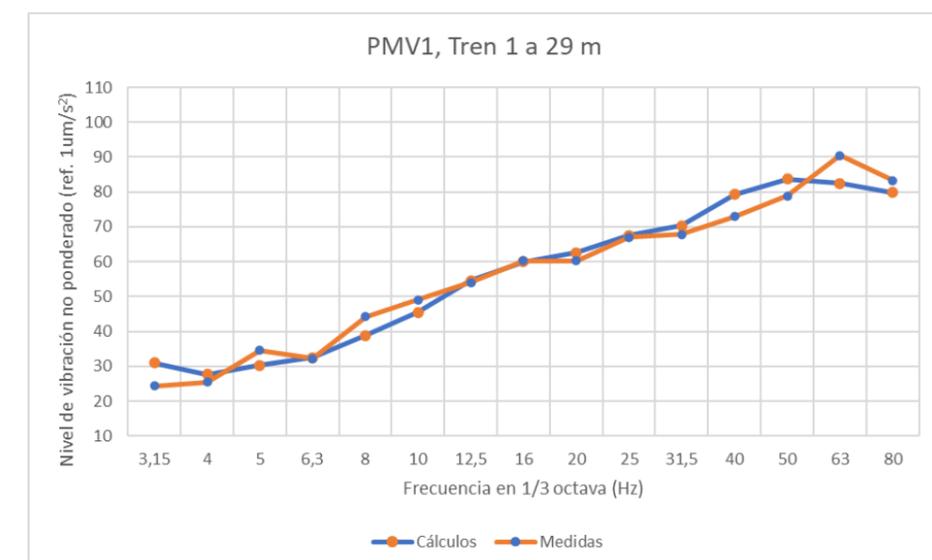
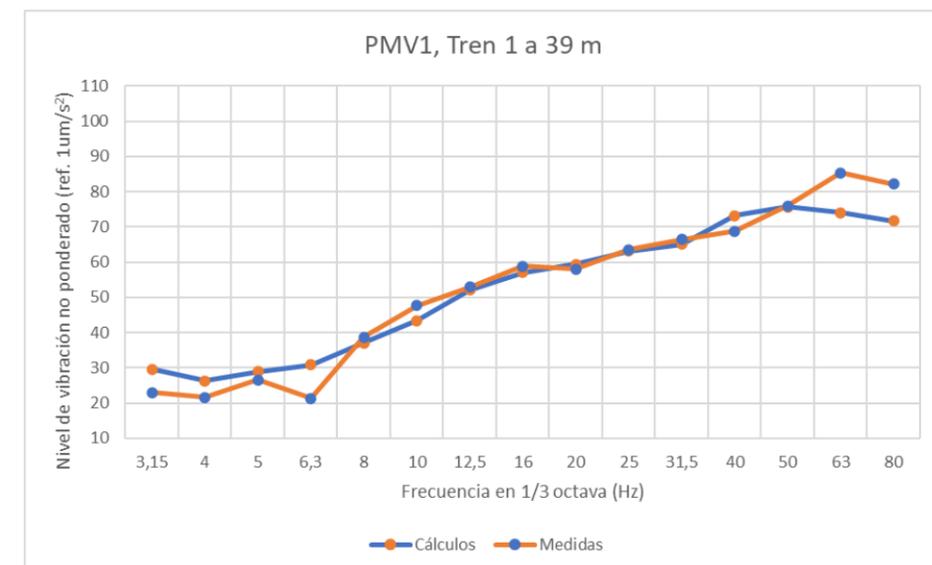
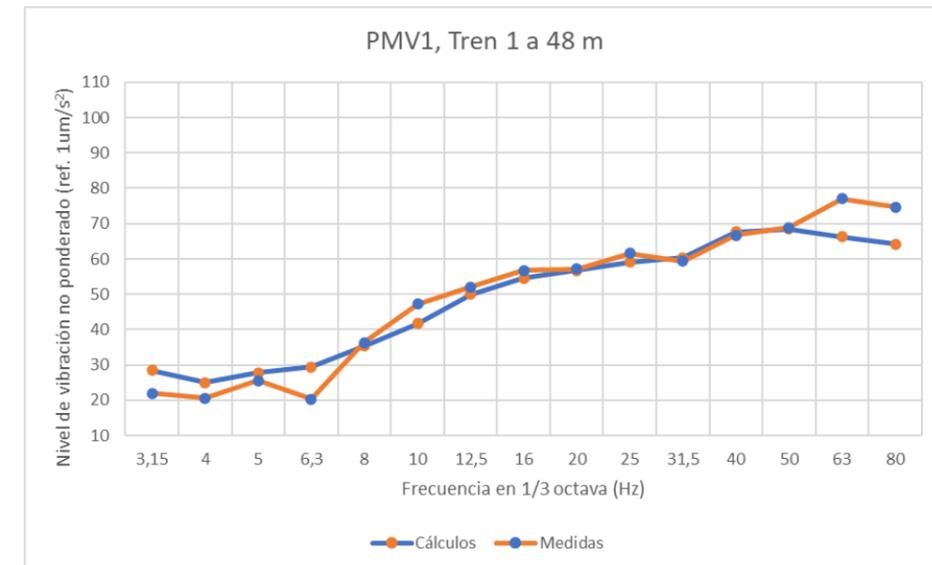
donde:

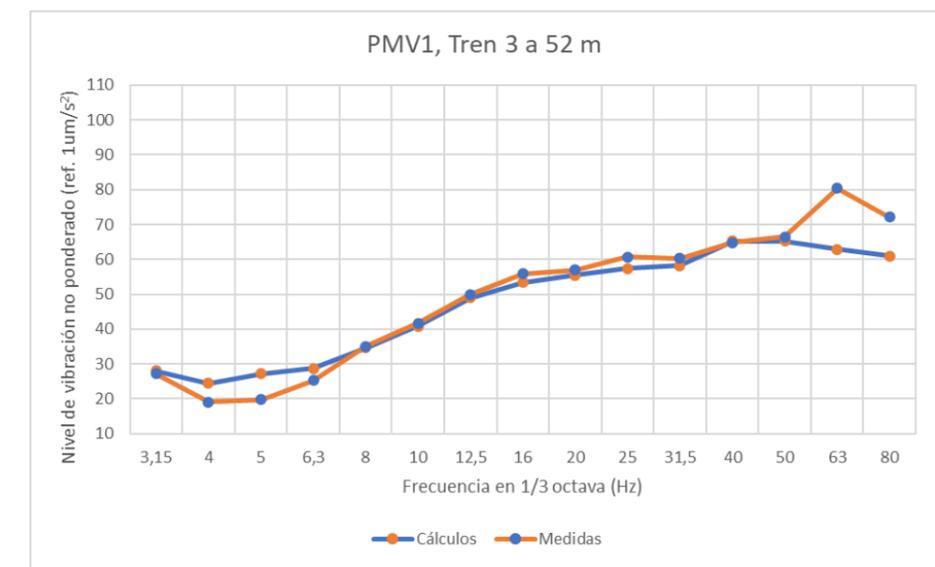
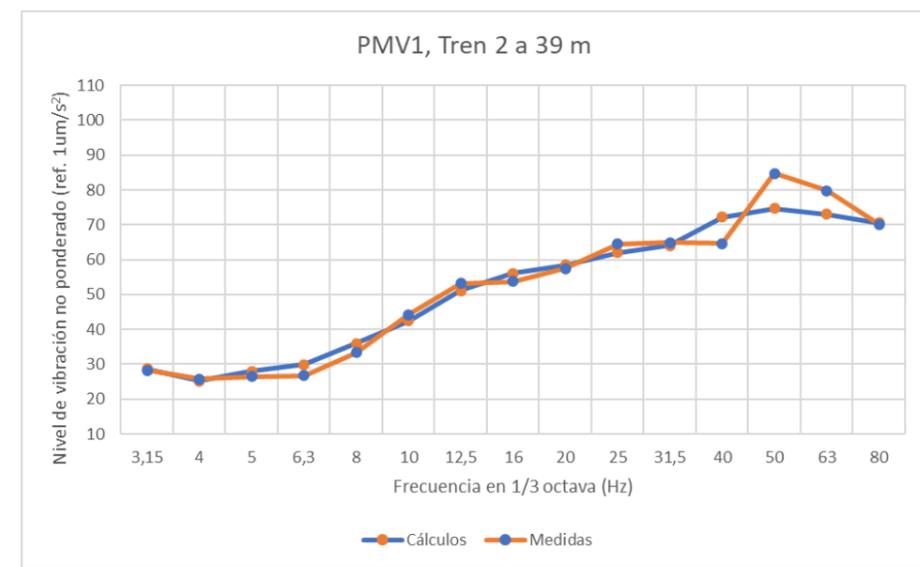
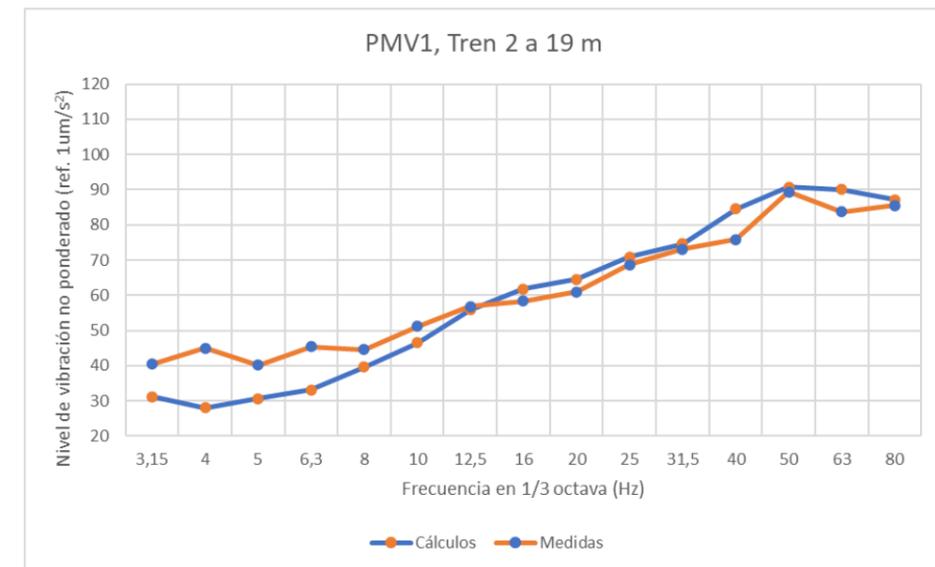
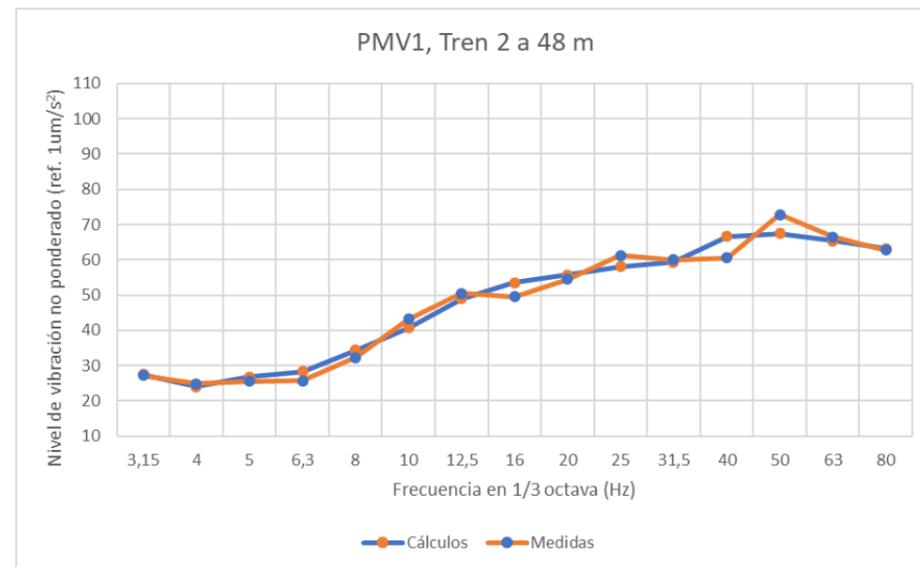
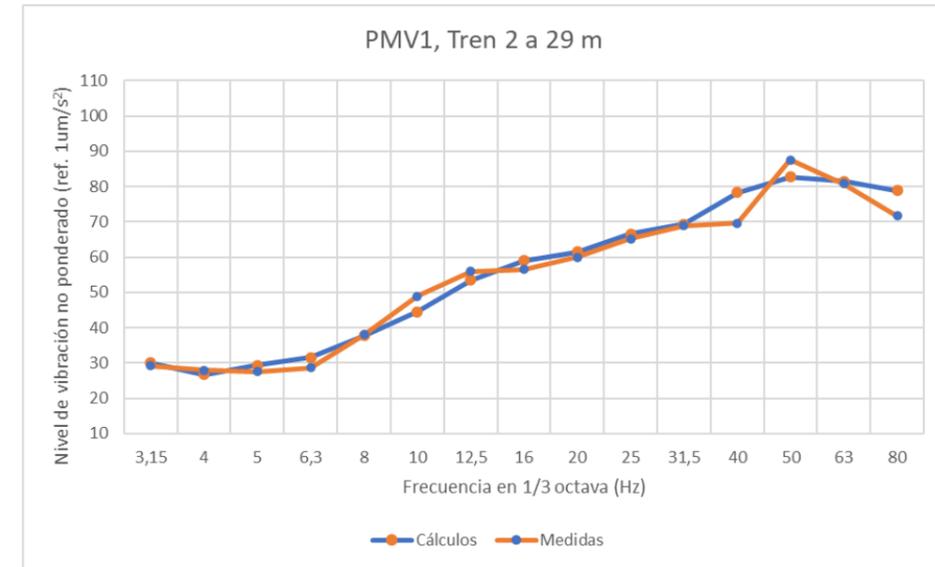
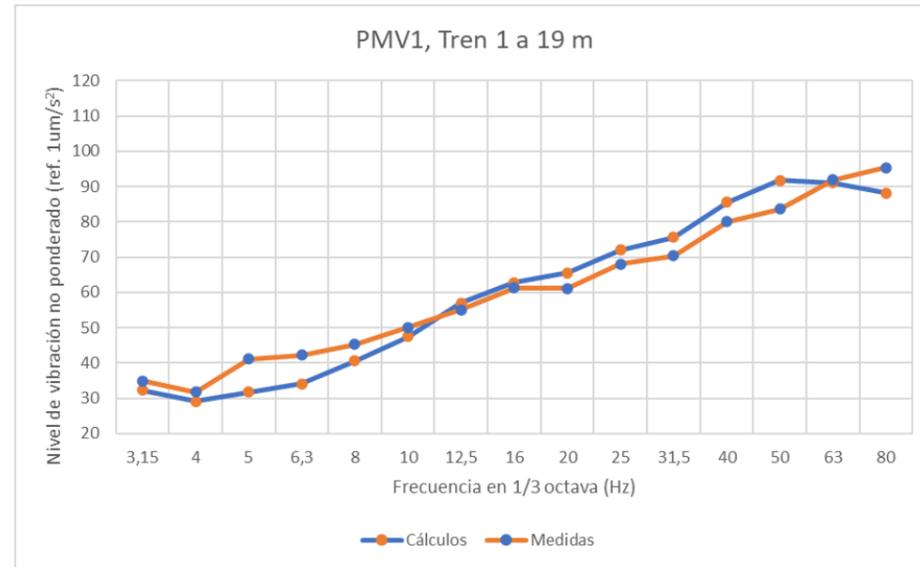
- $v(d)$ es la vibración transmitida a una distancia d de la fuente.
- $v(d_0)$ es la vibración transmitida a una distancia d_0 de la fuente.
- γ es la atenuación geométrica del terreno (considerado homogéneo, isótropo y linealmente viscoelástico). Al tratarse de una fuente lineal en superficie, se considera nulo.
- α es la atenuación debida a la disipación de energía por el terreno, que se ha determinado experimentalmente.

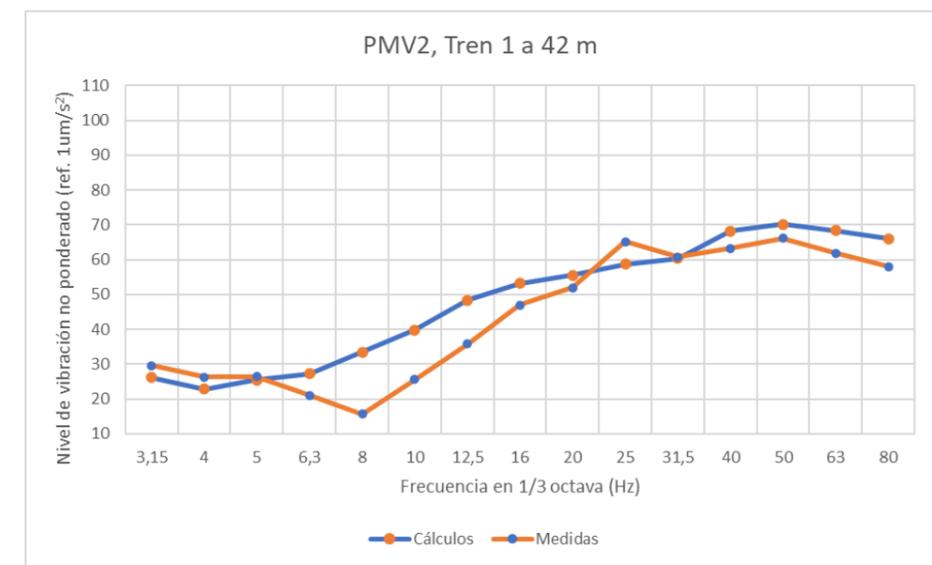
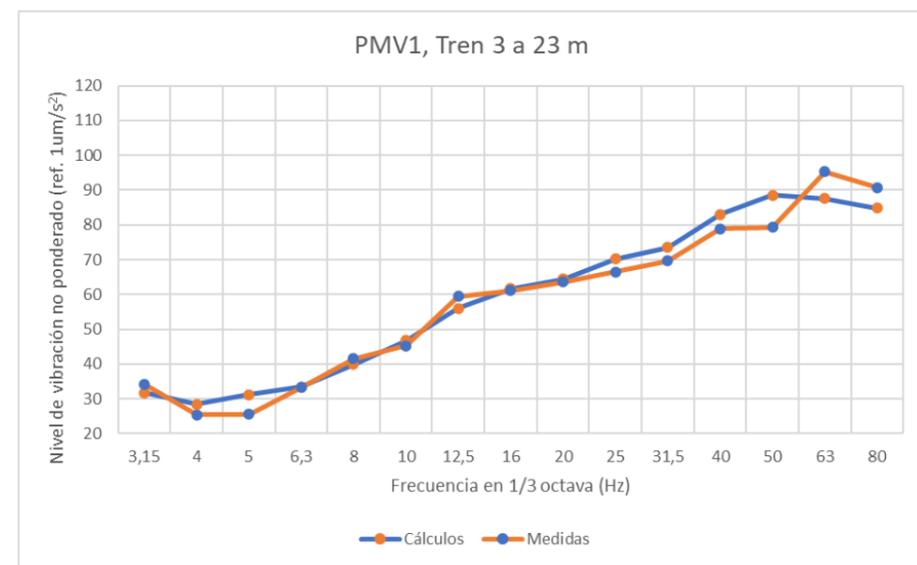
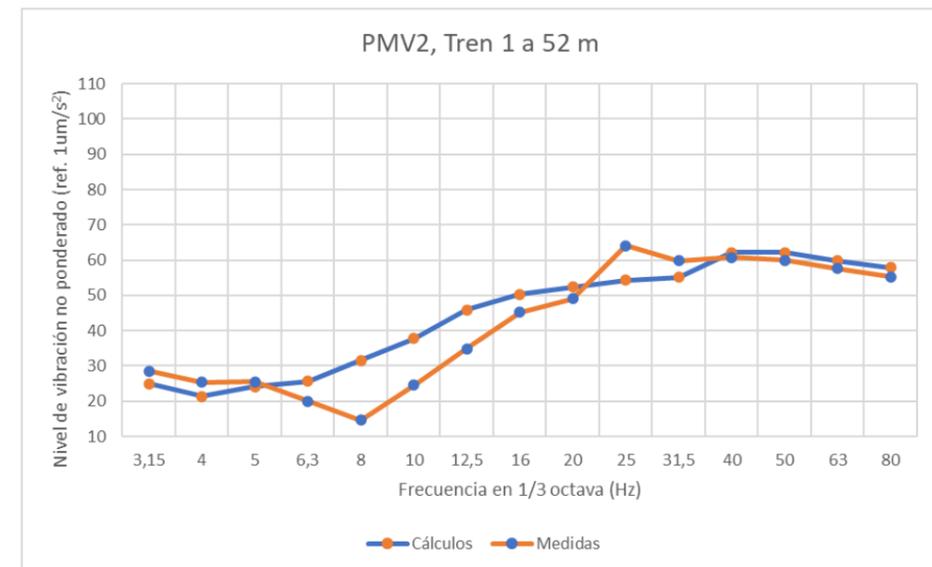
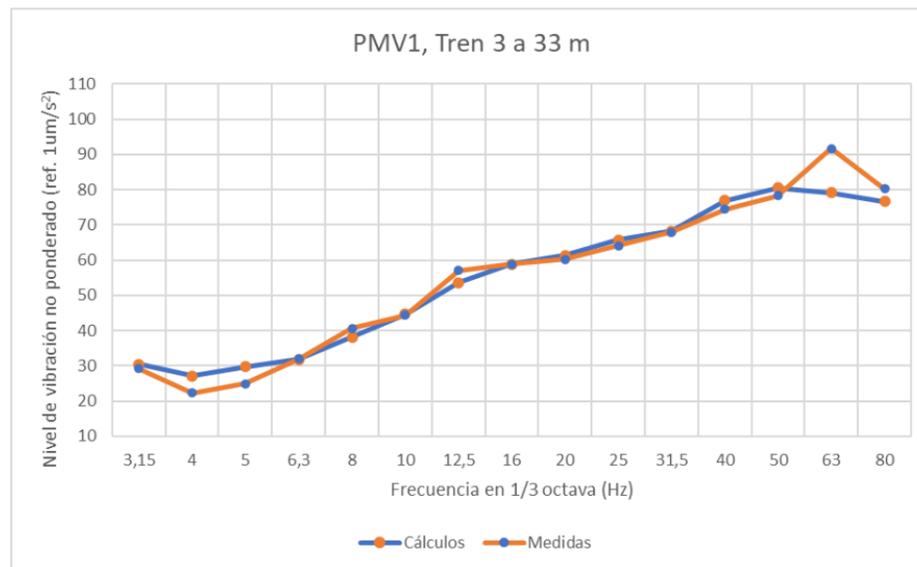
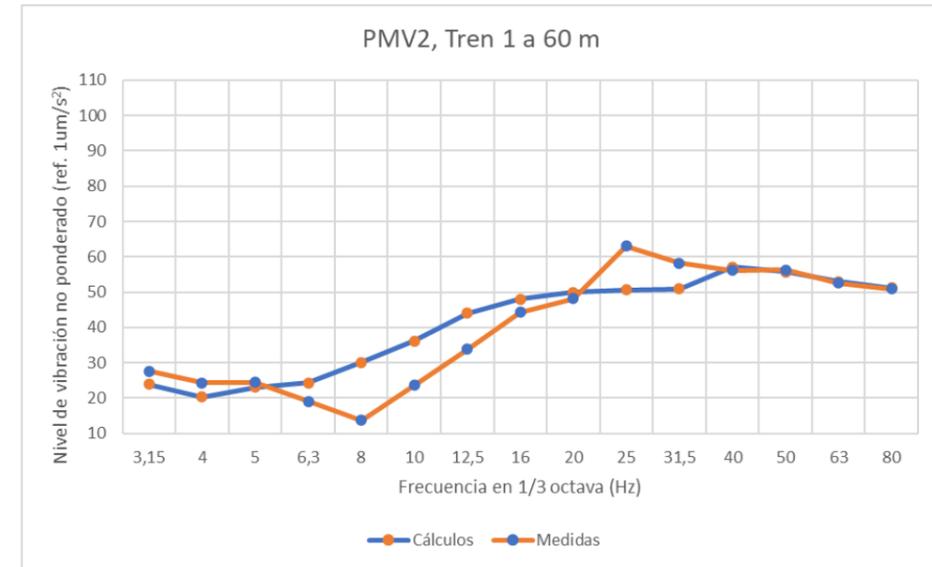
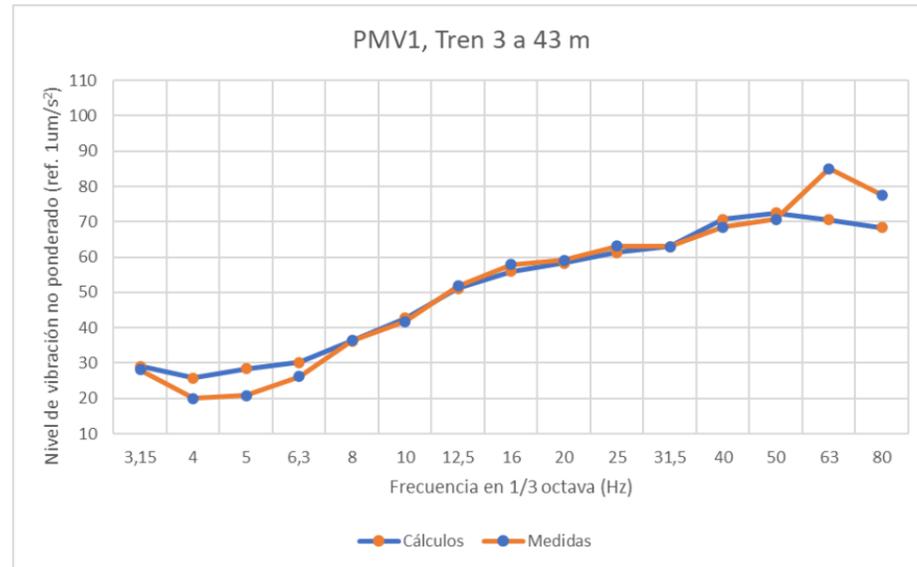
5.5. VALIDACIÓN DEL MODELO EN LA SITUACIÓN ACTUAL

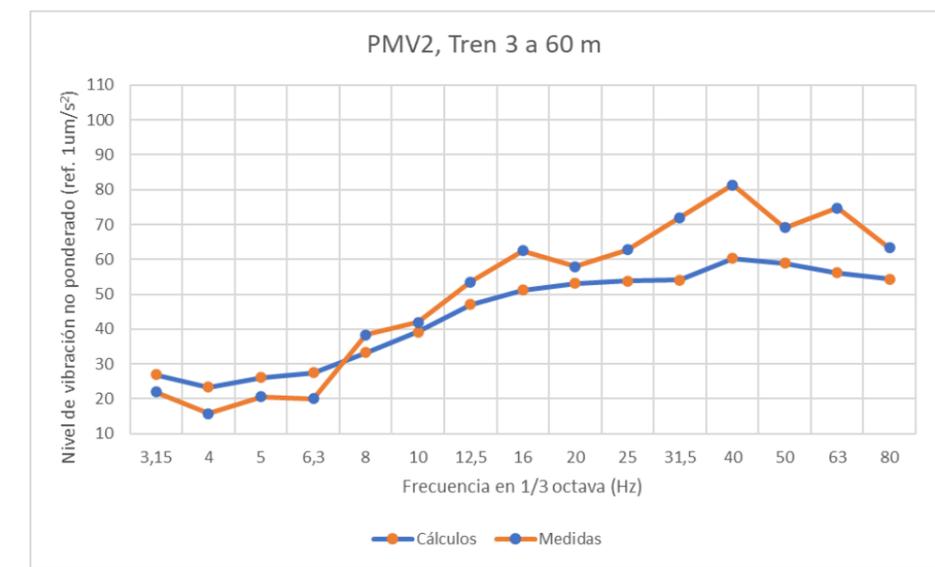
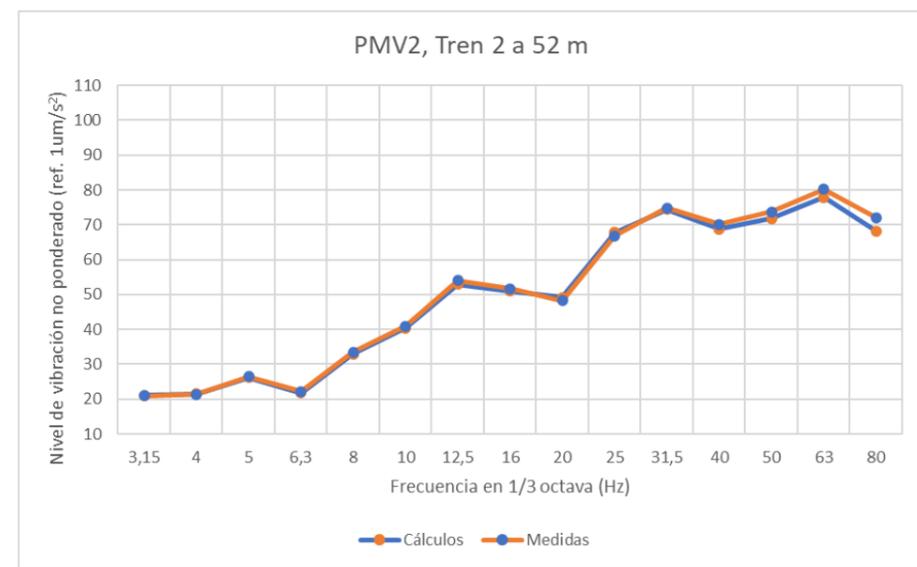
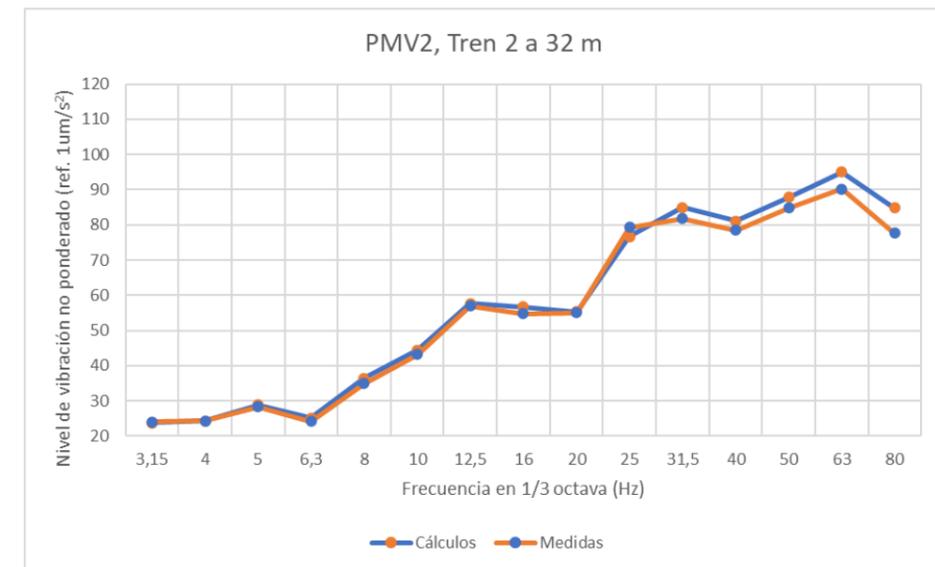
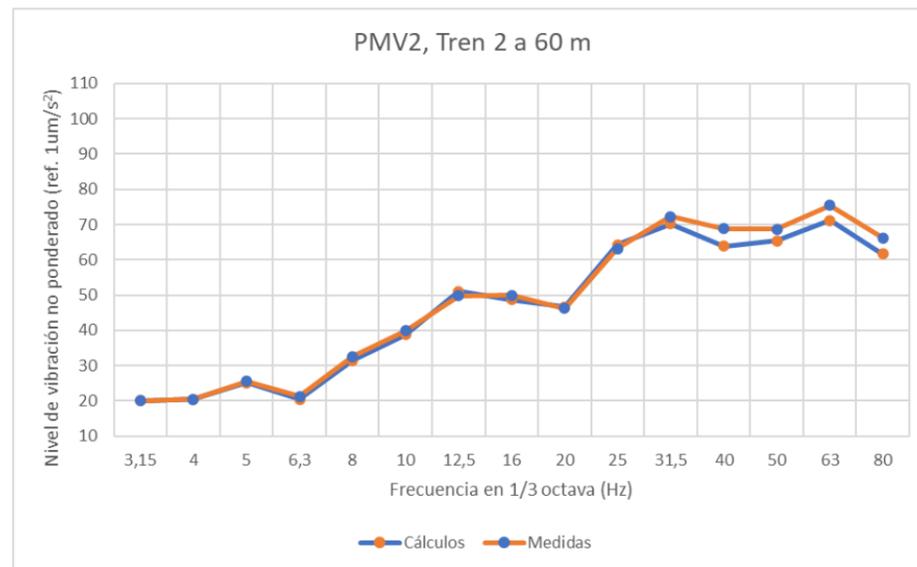
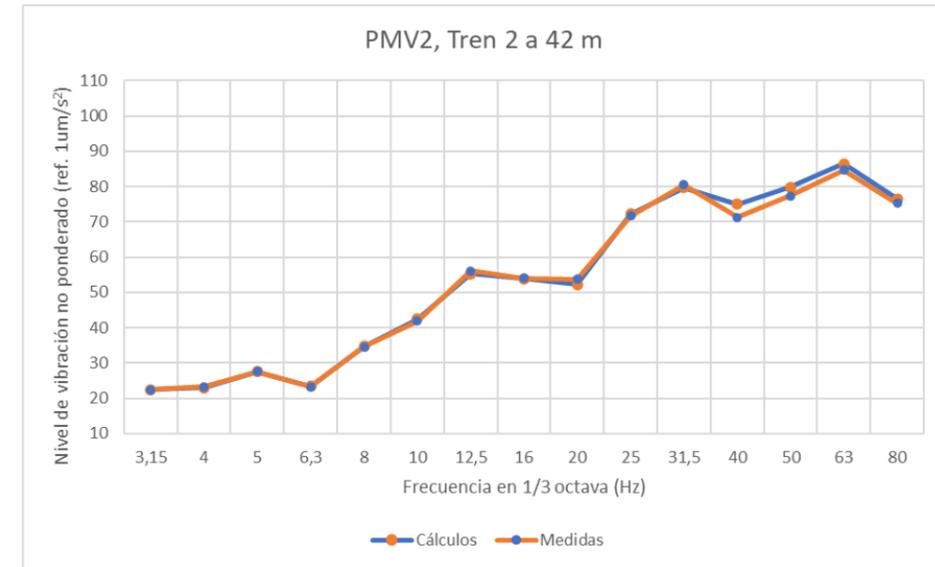
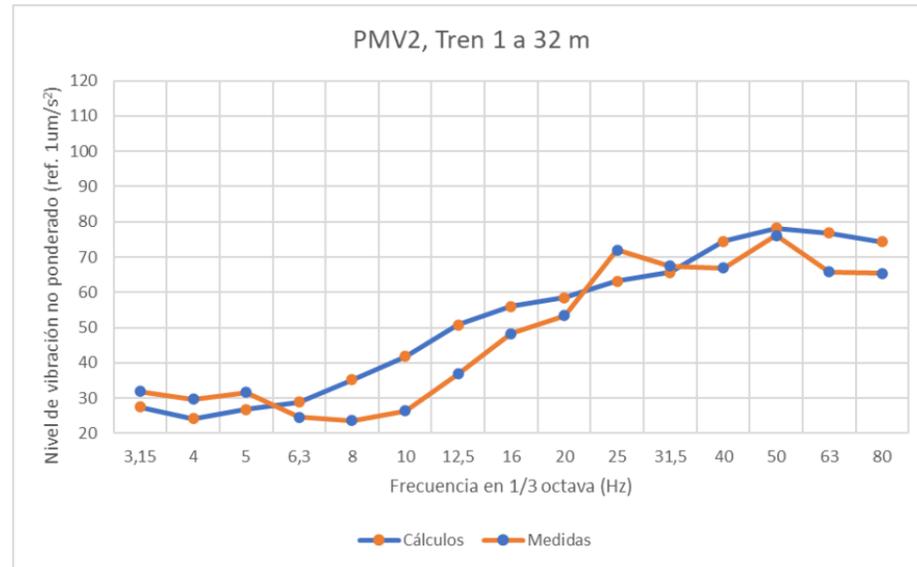
Llegado a este punto en el que ya se obtienen los resultados a cota de terreno, se procede a la calibración del modelo en comparación con los resultados de las mediciones realizadas también a cota de terreno. Para eso, se ajusta la fuerza de excitación en la situación actual calculada inicialmente con el método del impacto equivalente de Eisenmann para que sea coherente con los resultados de las mediciones realizadas en cada banda de tercio de octava.

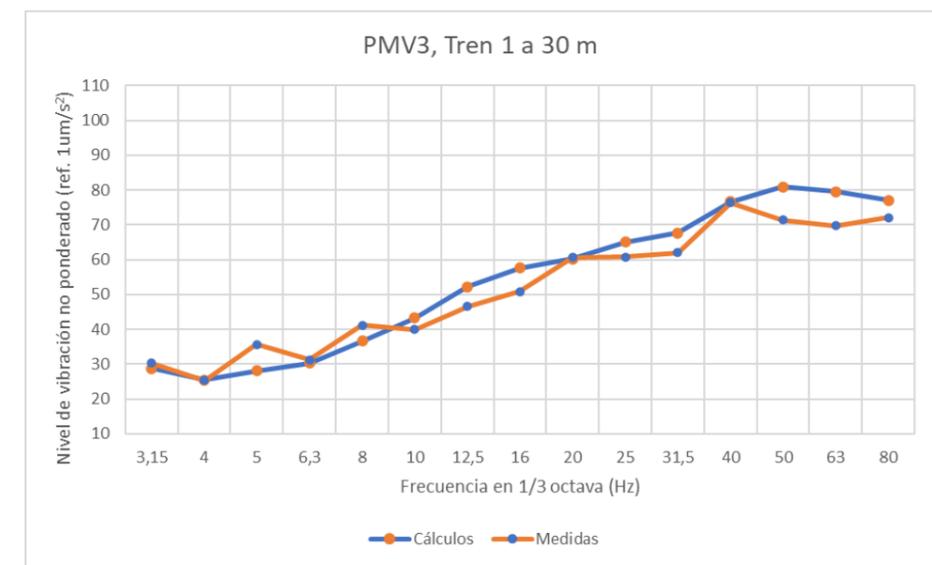
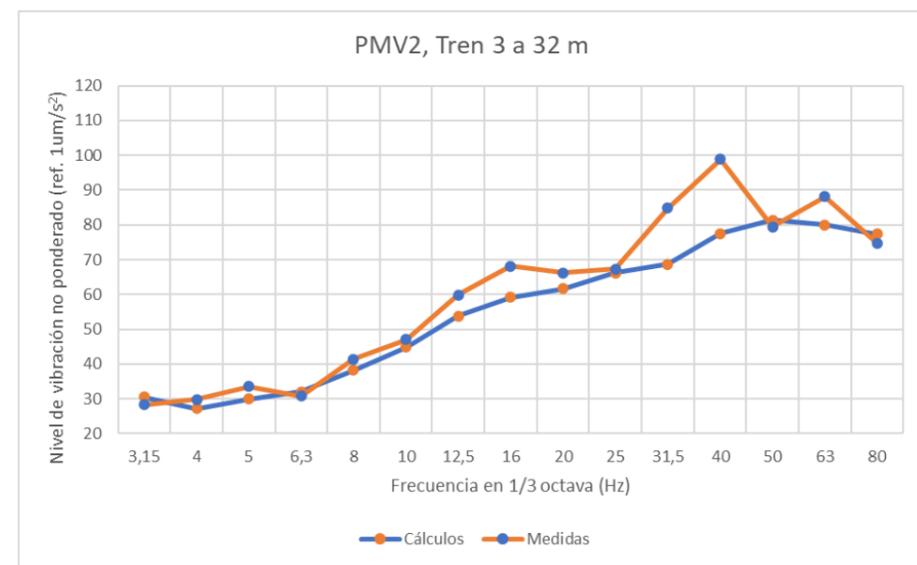
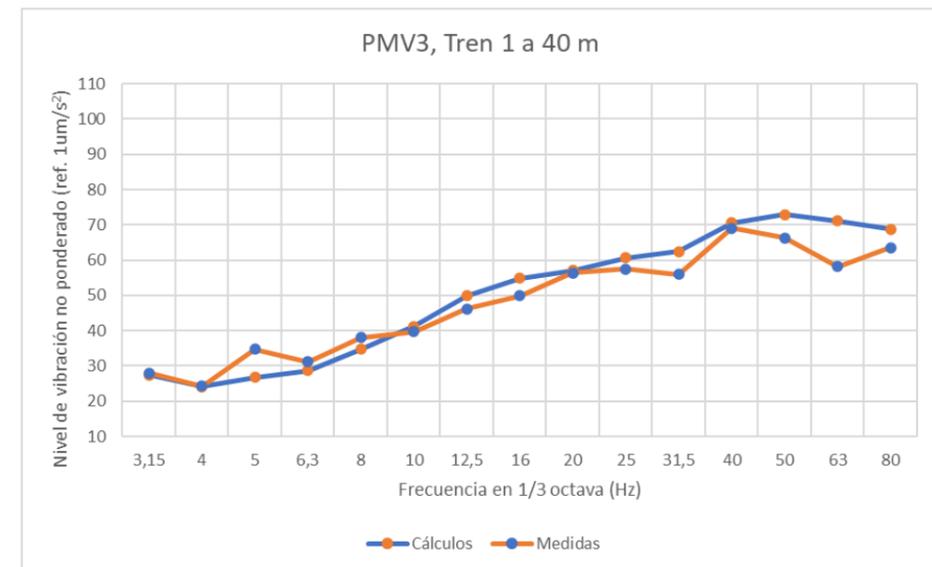
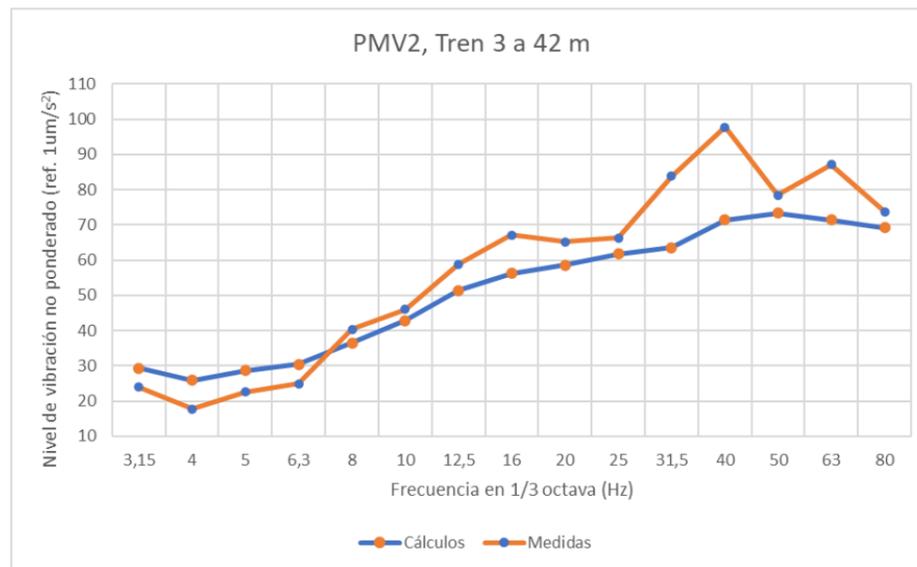
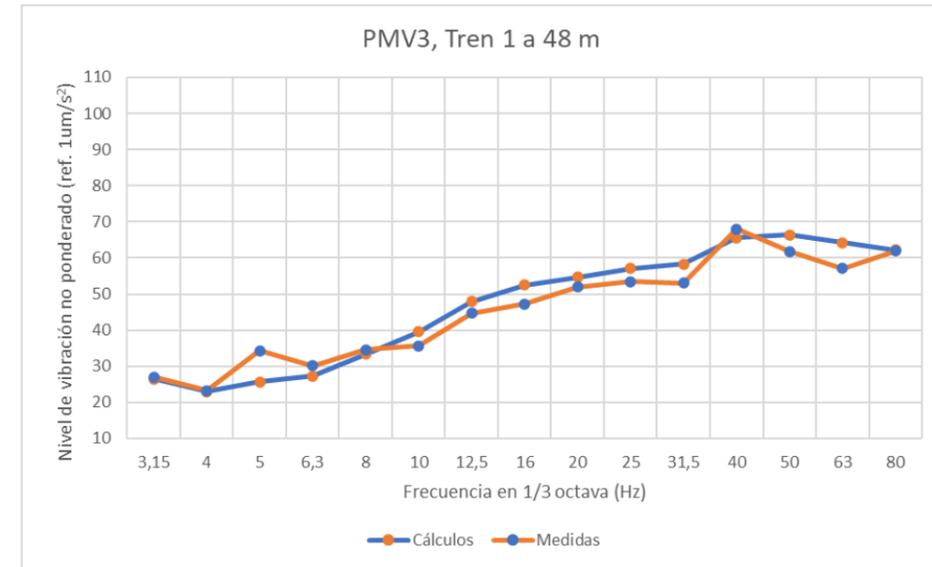
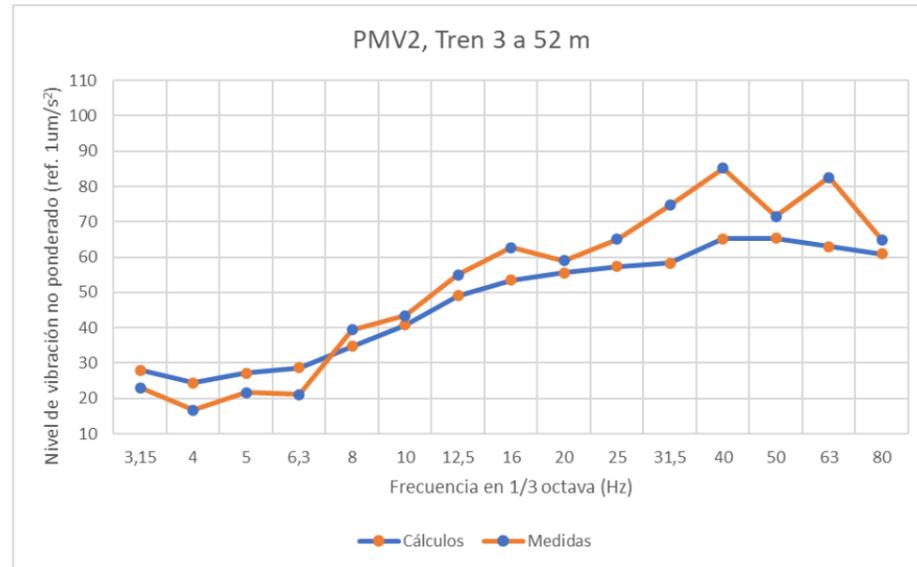
A continuación, se muestra la comparación entre los espectros medidos y calculados para comprobar que el modelo se ajusta adecuadamente a las mediciones a diferentes distancias, con diferentes tipos de trenes y a diferentes velocidades:

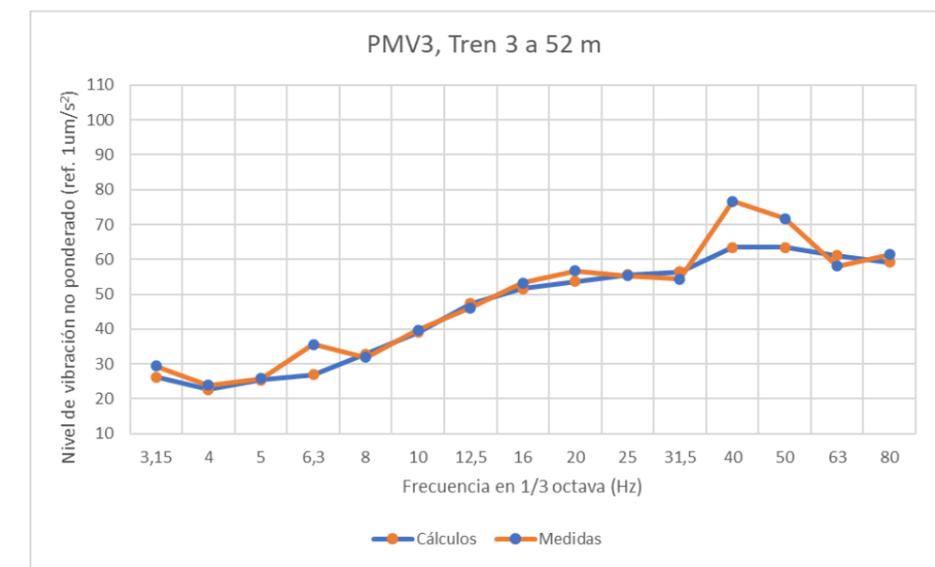
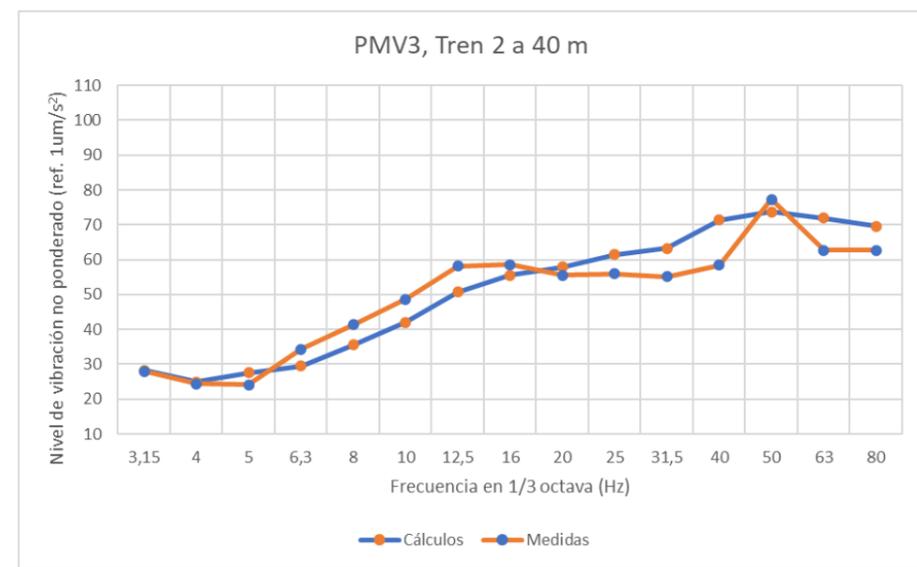
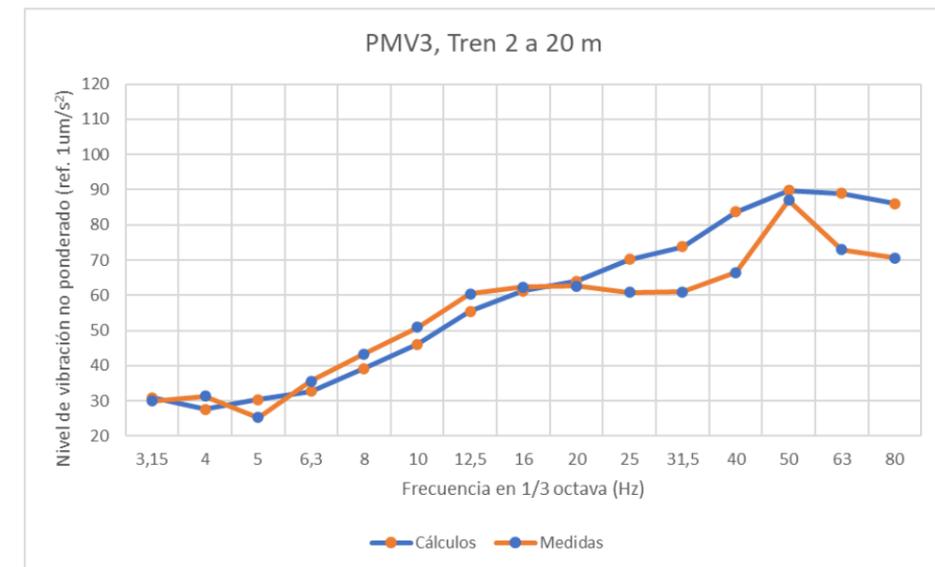
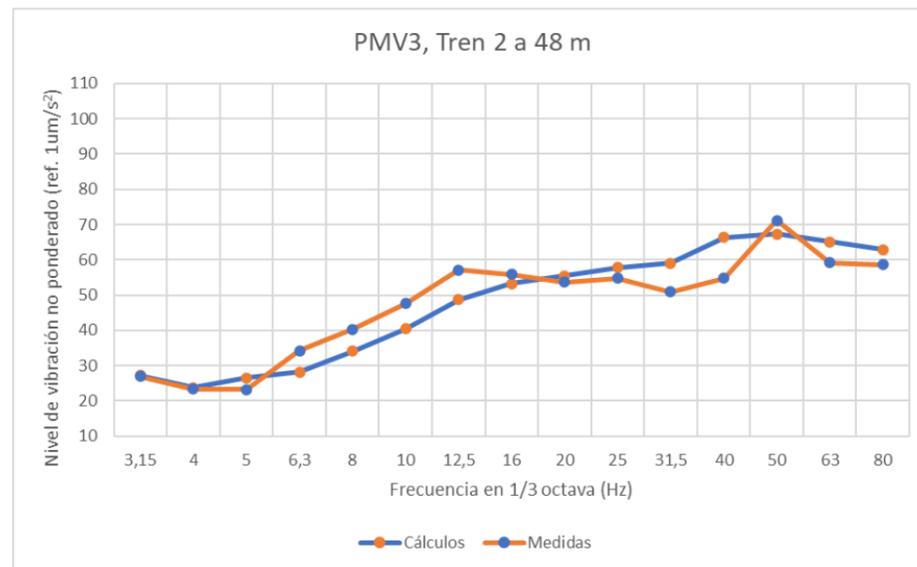
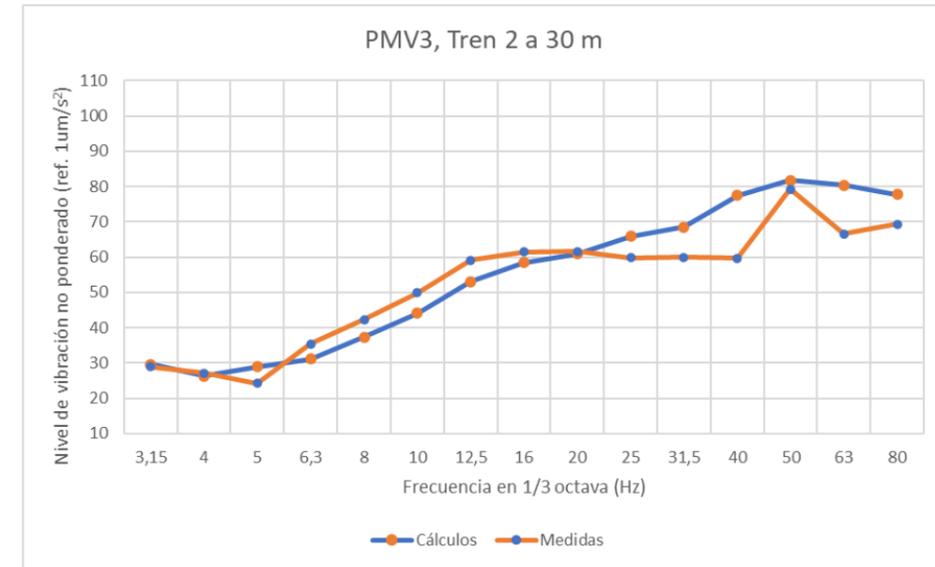
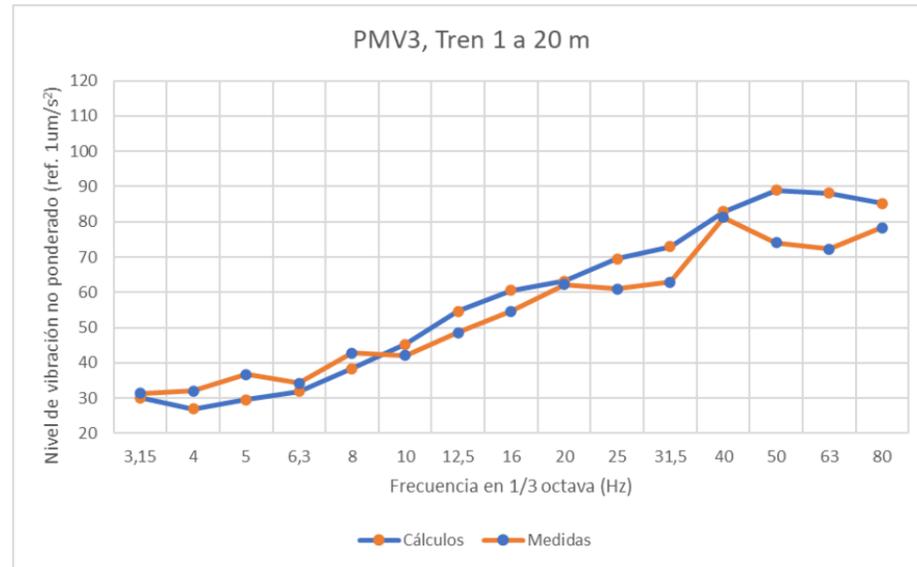


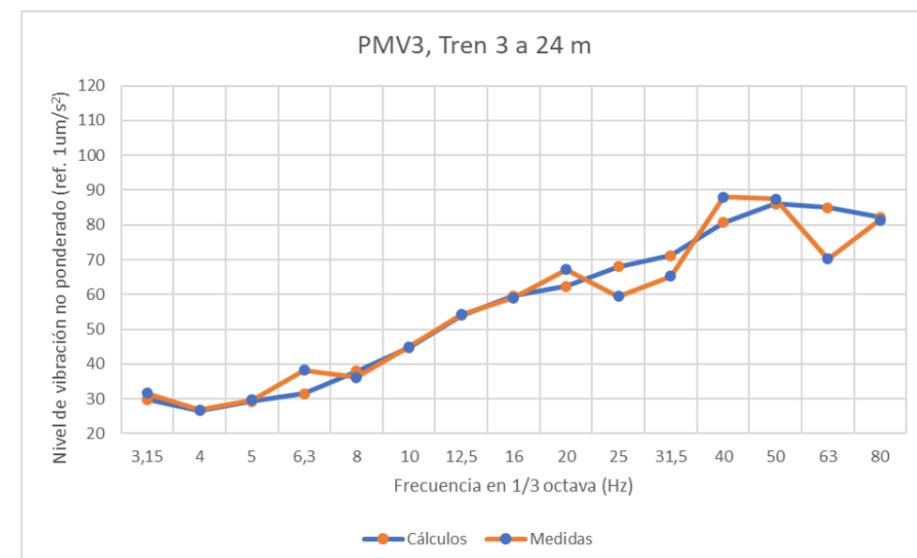
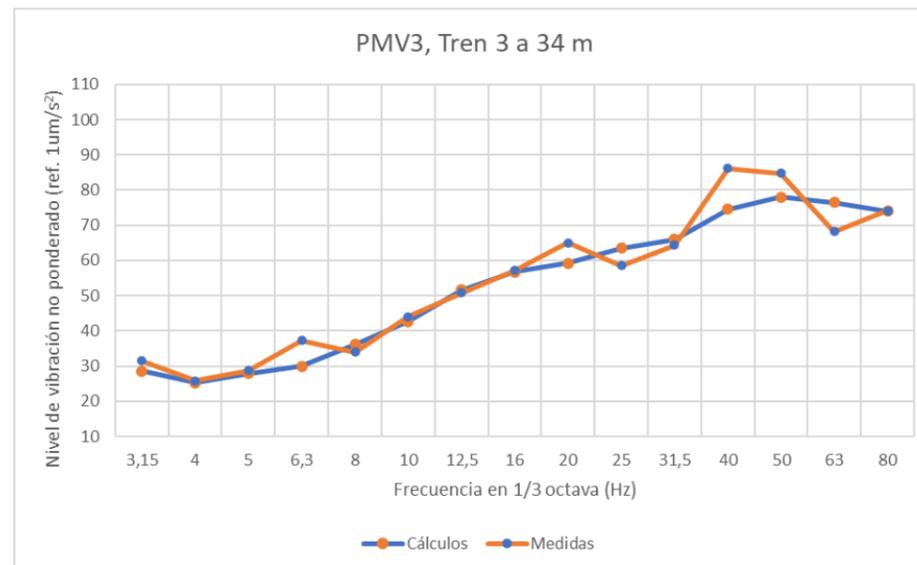
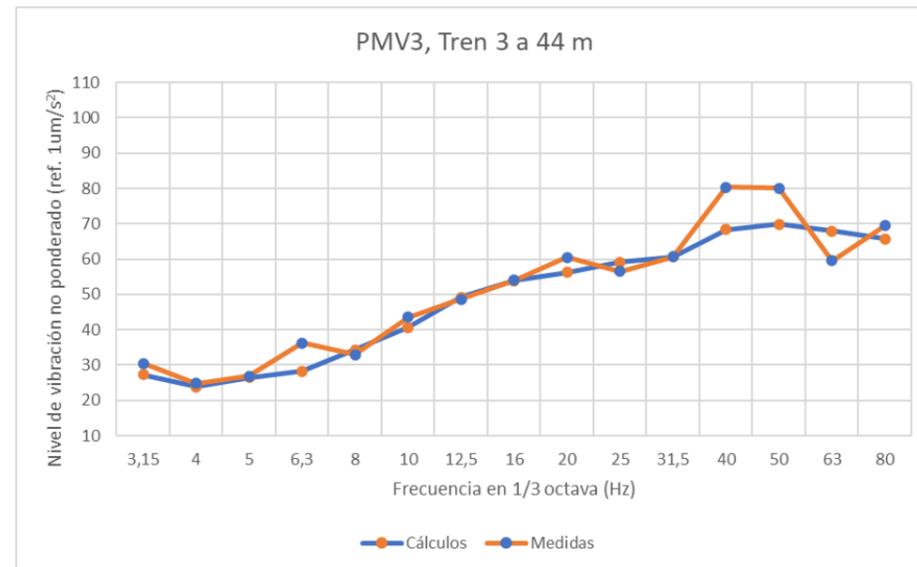








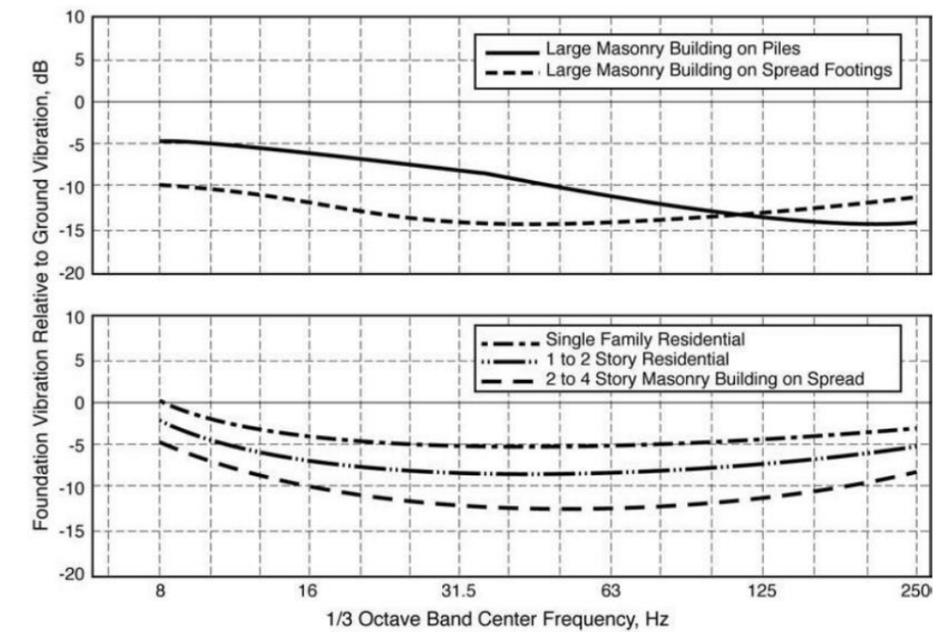




5.6. RECEPCIÓN EN EDIFICIOS

Tras determinar antes los niveles recibidos a cota de terreno a las diferentes distancias a las que se encuentran los edificios, se aplican ahora las correcciones del manual de evaluación de impacto por ruido y vibraciones de la Administración Federal de Tráfico (FTA) de los Estados Unidos de América (informe No. 123, de septiembre de 2018) para llevar cuenta del acople entre terreno y cimentaciones y de la amplificación debida a los modos propios de los primeros forjados, etc.

En concreto, para el acople entre edificio y terreno, se consideran las siguientes correcciones definidas en la figura 6-14 del manual de la FTA:



En cuanto a las resonancias, tal y como también se indica en el manual de la FTA para edificios de hormigón y/o mampostería, se considera una amplificación de 6 dB en las bandas de tercio de octava de 20, 25 y 31.5 Hz y 0 dB en las otras bandas de frecuencia.

Los resultados globales del análisis son entonces los espectros de aceleración previstos en la fase de explotación en cada edificio inventariado para las condiciones de circulación previstas en función de la distancia al trazado, de la velocidad y del tipo de edificio, obteniéndose los indicadores de percepción vibratoria K y Law.

5.7. RESULTADOS EN SITUACIÓN FUTURA

El resultado final de los cálculos son entonces los espectros de aceleración en tercio de octava previstos en la fase de explotación considerando las condiciones de circulación más desfavorables previstas y para todas las edificaciones sensibles. De este modo se obtienen los indicadores de percepción vibratoria Law y K.

Los resultados obtenidos para las dos alternativas analizadas se muestran en la siguiente tabla, en la que, nuevamente, se indica el índice K de forma meramente informativa para dar datos en frecuencia:

ID	MARGEN	DISTANCIA 2D ALT1 (M)	DISTANCIA 3D ALT1 (M)	DISTANCIA 2D ALT2 (M)	DISTANCIA 3D ALT2 (M)	USO	MUNICIPIO	ESTADO	Nº DE PLANTAS	VELOCIDAD (KM/H)	PREVISIÓN ALTERNATIVA 1		PREVISIÓN ALTERNATIVA 2		ÍNDICES LÍMITE DE VIBRACIONES			
											K y frecuencia	Law (dB)	K y frecuencia	Law (dB)	K	Law (dB)		
9	Derecha	52	53	52	53	Residencial	Vila-Seca	En uso	1	220	0,06	63 Hz	52,6	0,06	63 Hz	52,6	1,4	75
10	Izquierda	30	31	30	31	Otros	Vila-Seca	En uso	1	220	0,52	63 Hz	68,8	0,52	63 Hz	68,8	-	-
11	Derecha	45	45	44	44	Residencial	Vila-Seca	En uso	1	220	0,13	63 Hz	57,8	0,14	63 Hz	58,3	1,4	75
12	Derecha	16	16	11	12	Infraestructura	Vila-Seca	En uso	1	220	2,14	63 Hz	80,5	3,32	63 Hz	84,2	-	-
13	Derecha	51	51	46	46	Otros	Vila-Seca	En uso	1	220	0,07	63 Hz	53,6	0,12	63 Hz	57,0	-	-
14	Izquierda	61	61	56	56	Residencial	Vila-Seca	En uso	1	220	0,03	50 Hz	48,0	0,04	50 Hz	50,6	1,4	75
15	Izquierda	59	59	54	54	Otros	Vila-Seca	En uso	1	220	0,03	50 Hz	48,7	0,05	63 Hz	51,5	-	-
18	Derecha	28	29	23	24	Otros	Vila-Seca	En uso	1	220	0,62	63 Hz	70,2	0,99	63 Hz	74,1	-	-
23	Derecha	38	39	33	34	Otros	Vila-Seca	En uso	1	220	0,23	63 Hz	62,3	0,37	63 Hz	66,1	-	-
30	Izquierda	58	59	58	59	Industrial	Reus	En uso	1	220	0,03	50 Hz	49,2	0,03	50 Hz	49,2	8	-
32	Izquierda	50	50	50	50	Industrial	Reus	En uso	2	220	0,08	63 Hz	54,1	0,08	63 Hz	54,1	8	-
33	Derecha	54	54	54	54	Otros	Reus	En uso	1	220	0,05	63 Hz	51,8	0,05	63 Hz	51,8	-	-
34	Derecha	63	63	63	63	Otros	Reus	En uso	1	220	0,02	50 Hz	46,9	0,02	50 Hz	46,9	-	-
36	Izquierda	27	27	27	27	Infraestructura	Reus	En uso	1	220	0,75	63 Hz	71,8	0,75	63 Hz	71,8	-	-
38	Izquierda	27	27	27	27	Infraestructura	Reus	En uso	1	220	0,75	63 Hz	71,8	0,75	63 Hz	71,8	-	-
39	Izquierda	26	26	26	26	Infraestructura	Reus	En uso	1	220	0,81	63 Hz	72,5	0,81	63 Hz	72,5	-	-

6. MEDIDAS PROTECTORAS

Se ha valorado el cumplimiento de los objetivos de calidad y en base a los resultados obtenidos y la principal conclusión es que, en las condiciones analizadas, se prevé que en ninguna de las dos alternativas analizadas se superen los niveles normativos en ninguno de los receptores inventariados.

Consecuentemente, para alcanzar el cumplimiento de los objetivos de calidad establecidos en la legislación vigente, no se considera necesaria la implantación de medidas protectoras y, por tanto, se consideran ambas alternativas equivalentes desde el punto de vista vibratorio.

7. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

Se ha realizado el estudio de vibraciones de comparación entre dos alternativas, enmarcado dentro del “ESTUDIO INFORMATIVO DE LA ESTACIÓN INTERMODAL EN EL ÁMBITO DE TARRAGONA”, siguiendo las directrices recogidas en la IGP-6.4 de Adif “Estudio para la prevención de ruidos y vibraciones en fase de explotación”.

Para ello, se ha analizado la normativa de aplicación, concluyendo con el uso obligatorio del indicador Law y adicionalmente, de forma informativa solamente para dar información en frecuencia, del indicador K y sus valores máximos admisibles correspondientes, se han identificado los receptores sensibles, se ha realizado una campaña de mediciones para caracterizar el terreno desde el punto de vista vibratorio y comprobar el grado de afección en la actualidad y, finalmente, se han determinado los niveles de vibraciones en la situación futura.

Se ha concluido que, para cumplir con los objetivos de calidad vibratoria en las condiciones analizadas en todos los edificios inventariados, no es necesaria la implantación de medidas antivibratorias en ninguna de las dos alternativas.

Anexo 1. Plano de receptores sensibles y puntos de medida

• ALTERNATIVA 1

LEYENDA

Receptores

Edificios

Residencial

Industrial

Infraestructura

Otros

Punto de medida

• Puntos de Medida



• **ALTERNATIVA 2**

LEYENDA

Receptores

Edificios

Residencial

Industrial

Infraestructura

Otros

Punto de medida

• Puntos de Medida

