

Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Análisis estadístico de las vibraciones producidas por
el paso de trenes en diferentes líneas ferroviarias

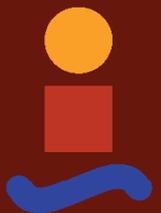
Autor: Manuel Jesús Cartes Cumbreiras

Tutor: Pedro Galvín Barrera

Dep. de Mecánica de medios continuos y teoría
de estructuras

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería Civil

**Análisis estadístico de las vibraciones
producidas por el paso de trenes en diferentes
líneas ferroviarias**

Autor:

Manuel Jesús Cartes Cumbreiras

Tutor:

Pedro Galvín Barrera

Profesor titular

Dep. de Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Grado: Análisis estadístico de las vibraciones producidas por el paso de trenes en diferentes líneas ferroviarias

Autor: Manuel Jesús Cartes Cumbreiras
Tutor: Pedro Galvín Barrera

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

Agradecimientos

Después de estos intensos años de estudio en la escuela no me queda más remedio que dar las gracias a todos los que habéis contribuido en mayor o menor medida a hacer esto posible.

A mis padres y hermanos dar las gracias a mi familia por todo el apoyo que me han brindado durante estos años de grado y por enseñarme que nunca hay que dar nada por perdido.

A todos mis compañeros, algunos de los cuales dejaron de ser compañeros para ser amigos hace mucho tiempo. A Rafa, Manolo, Álvaro, Sergio y David.

Por supuesto a mi tutor, Pedro Galvín, por su infinita paciencia y por encontrar siempre un momento para mí.

Por último, a todos mis profesores, que han hecho en mayor o en menor medida que me guste lo que estudio. Por hacer sencillo lo complicado.

*Manuel Jesús Cartes Cumbreiras
Sevilla, 2019*

Resumen

El paso de trenes, sean de alta velocidad o no, genera un gran nivel de vibraciones, que depende de muchos factores. Estos esfuerzos se van a transmitir por el terreno hasta disiparse.

El aumento de las velocidades comerciales ha llevado consigo un aumento de estas vibraciones, que pueden llegar a ser especialmente altas en caso de que la velocidad se aproxime a la velocidad de propagación de ondas del suelo.

Este trabajo fin de grado surge como idea para establecer una relación entre el nivel de vibración medido y distintas variables, como la distancia a la vía, la velocidad de paso del tren o la velocidad de propagación de ondas del suelo. Para ello se han usado resultados de ensayos, que ya habían sido realizados, de medidas de aceleraciones al paso de trenes. Estos resultados han tenido que ser clasificados y ordenados para luego poder establecer la relación con las distintas variables que se van a estudiar.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xviii
1 INTRODUCCIÓN	1
2 RESULTADOS EXPERIMENTALES	3
2.1 <i>Introducción</i>	3
2.2 <i>Bruselas</i>	4
2.2.1 La vía	4
2.2.2 El suelo	5
2.2.3 Medidas in situ	6
2.2.4 Trenes	7
2.3 <i>Arroyo de las piedras</i>	8
2.3.1 Medidas in situ	9
2.3.2 Trenes	9
2.4 <i>Córdoba</i>	10
2.4.1 La vía	10
2.4.2 El suelo	11
2.4.3 Medidas in situ	12
2.4.4 Trenes	13
2.5 <i>Écija</i>	15
2.5.1 La vía	15
2.5.2 Medidas in situ	16
2.5.3 Trenes	17
2.6 <i>Orense</i>	18
2.6.1 El suelo	19
2.6.2 Medidas in situ	21
2.6.3 Trenes	21
2.7 <i>Palencia</i>	22
2.7.1 El suelo	25
2.7.2 Medidas in situ	26
2.7.3 Trenes	26
2.8 <i>Reugny</i>	30
2.8.1 La vía	30
2.8.2 El suelo	30
2.8.3 Medidas in situ	31

2.8.4	Trenes	31
2.9	<i>Saint-Épain</i>	32
2.9.1	La vía	32
2.9.2	El suelo	32
2.9.3	Medidas in situ	33
2.9.4	Trenes	33
2.10	<i>Zamora</i>	34
2.10.1	El suelo	35
2.10.2	Medidas in situ	36
2.10.3	Trenes	37
3	Tratamiento de datos	39
3.1	<i>Introducción</i>	39
3.2	<i>Aceleración máxima</i>	39
3.3	<i>Índice Law</i>	41
3.4	<i>Índice K</i>	43
4	RESULTADOS OBTENIDOS.....	46
4.1	<i>Introducción</i>	46
4.2	<i>Distancia del acelerómetro</i>	48
4.3	<i>Velocidad de paso del tren</i>	52
4.4	<i>Velocidad de propagación de las ondas S</i>	56
4.5	<i>Tipo de tren</i>	61
4.6	<i>Velocidad de paso del tren y distancia del acelerómetro</i>	63
4.7	<i>Velocidad de paso y velocidad de propagación de las ondas S del suelo</i>	74
4.8	<i>Distancia del acelerómetro y velocidad de propagación de las ondas S del suelo</i>	76
5	Conclusiones y desarrollos futuros	81
	Anexos	84
	Referencias	91

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Perfil del terreno del ensayo de bruselas	6
Tabla 2-2 Características geométricas y máxicas del s100	8
Tabla 2-3 Velocidades de paso del tren en los ensayos de bruselas	8
Tabla 2-4 Características geométricas y máxicas del ave s103	10
Tabla 2-5 Velocidades de paso del tren en los ensayos del arroyo de las piedras	10
Tabla 2-6 Perfil del terreno del ensayo de córdoba	12
Tabla 2-7 Velocidades de paso de la locomotora 252 (I252), el s100 y el ave talgo (talg) en los ensayos de córdoba	14
Tabla 2-8 Velocidades de paso de la locomotora serie 58 (Is58)	18
Tabla 2-9 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 4 (orense)	20
Tabla 2-10 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 7 (orense)	20
Tabla 2-11 Velocidades de paso en el subtramo 4	22
Tabla 2-12 Velocidades de paso en el subtramo 6	22
Tabla 2-13 Velocidades de paso en el subtramo 7	22
Tabla 2-14 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 10A	25
Tabla 2-15 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 10B	25
Tabla 2-16 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 10C	25
Tabla 2-17 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 11A	26
Tabla 2-18 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 11B	26
Tabla 2-19 Distancias de los acelerómetros en los ensayos realizados en palencia	26
Tabla 2-20 Velocidades de paso en el subtramo 10A	27
Tabla 2-21 Velocidades de paso en el subtramo 10B	27
Tabla 2-22 Velocidades de paso en el subtramo 10C	28
Tabla 2-23 Velocidades de paso en el subtramo 11A	28
Tabla 2-24 Velocidades de paso en el subtramo 11B	28
Tabla 2-25 Velocidades de paso en el subtramo 11C	29
Tabla 2-26 Perfil del terreno del ensayo en reugny	30

Tabla 2-27 Características geométricas y másicas del tgv duplex	31
Tabla 2-28 Velocidad de paso de los trenes durante los ensayos en reugny	32
Tabla 2-29 Perfil del terreno del ensayo en saint-épain	33
Tabla 2-30 Características geométricas y másicas del tren de mercancías en su primer paso	33
Tabla 2-31 Características geométricas y másicas del tren de mercancías en su segundo paso	33
Tabla 2-32 Características geométricas y másicas del ter tipo agc	34
Tabla 2-33 Velocidad de paso de los trenes durante los ensayos en saint-épain	34
Tabla 2-34 Perfil del terreno del ensayo de la zona 1	36
Tabla 2-35 Perfil del terreno del ensayo de la zona 2	36
Tabla 2-36 Perfil del terreno del ensayo de la zona 6	36
Tabla 2-37 Distancias de los acelerómetros en los ensayos realizados en zamora	37
Tabla 2-38 Velocidad de paso de los trenes durante los ensayos en la zona 1 (zamora)	37
Tabla 2-39 Velocidad de paso de los trenes durante los ensayos en la zona 2(zamora)	38
Tabla 2-40 Velocidad de paso de los trenes durante los ensayos en la zona 6 (zamora)	38
Tabla 3-1 Valores límite del índice law según el r.d. 1367/2007	42
Tabla 3-2 Cálculo del índice k en función de la frecuencia de la banda de tercio de octava	44
Tabla 3-3 Valores límite del índice k según el anexo a de la norma iso 2631-2	45
Tabla 4-1 Perfil del terreno del ensayo de bruselas	46
Tabla 4-2 Coeficientes cs medios de cada ensayo	47
Tabla 4-3 Coeficientes de correlación, media, varianza, desviación típica y porcentaje dentro del intervalo de confianza de los distintos indicadores de vibración frente a la distancia	52
Tabla 4-4 Coeficientes de correlación, media, varianza, desviación típica y porcentaje dentro del intervalo de confianza de los distintos indicadores de vibración frente a la velocidad de paso	56
Tabla 4-5 Coeficientes de correlación, media, varianza, desviación típica y porcentaje dentro del intervalo de confianza de los distintos indicadores de vibración frente al coeficiente cs	61
Tabla 4-6 Medias y varianzas de los índices law de cada tipo de tren	63
Tabla 4-7 Media, varianza y coeficiente de correlación de los índices de law del ensayo de arroyo de las piedras	64

Tabla 4-8 Media, varianza y coeficiente de correlación los índices de law del ensayo de bruselas	67
Tabla 4-9 Media, varianza y coeficiente de correlación de las aceleraciones producidas por el paso de trenes en córdoba	70
Tabla 4-10 Media, varianza y coeficiente de correlación de las aceleraciones producidas por el paso de trenes en reugny	71
Tabla 4-11 Media, varianza, desviación típica y coeficiente de correlación del índice law para una distancia de 15M	76
Tabla 4-12 Media, varianza y coeficiente de correlación del índice law para una velocidad de 50KM/h	80
Tabla 4-13 Media, varianza y coeficiente de correlación del índice law para una velocidad de 100KM/h	80
Tabla 4-14 Media, varianza y coeficiente de correlación del índice law para una velocidad de 250KM/h	80
Tabla 5-1 Porcentaje de puntos (%) dentro del intervalo de confianza a la hora de representar aceleración máxima, índice law e índice k frente a la distancia, la velocidad de paso y el cs medio del suelo	81
Tabla 5-2 Coeficiente de desviación de aceleración máxima, índice law e índice respecto a la distancia, la velocidad de paso y el cs medio del suelo	82
Tabla 5-3 Coeficiente de variación de aceleración máxima, índice law e índice respecto a la distancia, la velocidad de paso y el cs medio del suelo	82

Índice de Figuras

Figura 2-1 Planta de la vía París-Bruselas	4
Figura 2-2 Vía del Thalys HST entre Bruselas y París.	5
Figura 2-3 Comparación entre la curva experimental (discontinua) y la curva teórica (continua)	5
Figura 2-4 Acelerómetro situado en carril y traviesa (izquierda) y acelerómetro situado sobre estaca de aluminio (derecha)	6
Figura 2-5 Localización de los puntos de medida	7
Figura 2-6 Tren Thalys HST en circulación	7
Figura 2-7 Configuración del tren S100	7
Figura 2-8 Representación del viaducto sobre el Arroyo de las Piedras	8
Figura 2-9 AVE S103 en circulación	9
Figura 2-10 Esquema de la vía de la línea de alta velocidad Córdoba-Málaga	11
Figura 2-11 Comparación entre la curva experimental y la curva teórica obtenidas a partir del ensayo SASW	11
Figura 2-12 . Atenuación de la amplitud de vibración en el terreno	12
Figura 2-13 Acelerómetro adherido a carril y traviesas (izquierda) y acelerómetro sísmico (derecha)	13
Figura 2-14 Localización de los puntos de medida en el ensayo de Córdoba	13
Figura 2-15 Configuración del tren AVE-Talgo	14
Figura 2-16 Locomotora 252	15
Figura 2-17 Vía de la línea de alta velocidad entre Córdoba y Málaga	16
Figura 2-18 Localización de los puntos de medida de la primera configuración (Écija)	16
Figura 2-19 Acelerómetros adheridos a carril y traviesas (izquierda) y acelerómetro sísmico (derecha)	17
Figura 2-20 Locomotora Serie 58	17
Figura 2-21 Localización de los ensayos realizados en el subtramo 4	18
Figura 2-22 Localización de los ensayos realizados en el subtramo 6	19
Figura 2-23 Localización de los ensayos realizados en el subtramo 7	19
Figura 2-24 Equipo utilizado para producir las cargas impulsivas para la caracterización del terreno	20
Figura 2-25 Tren AVE S730 en circulación	21

Figura 2-26 Localización de los ensayos en la zona 10 ^a	23
Figura 2-27 Localización de los ensayos en la zona 10B	23
Figura 2-28 . Localización de los ensayos en la zona 10C	23
Figura 2-29 Localización de los ensayos en la zona 11 ^a	24
Figura 2-30 Localización de los ensayos en la zona 11B	24
Figura 2-31 Localización de los ensayos en la zona 11C	24
Figura 2-32 Línea atlántica LGV, donde se realizaron los ensayos	30
Figura 2-33 TGV Duplex (TGVD)	31
Figura 2-34 Localización de los ensayos en Saint-Épain	32
Figura 2-35 Localización de los ensayos en la zona 1 (Zamora)	34
Figura 2-36 Localización de los ensayos en la zona 2 (Zamora)	35
Figura 2-37 Localización de los ensayos en la zona 6 (Zamora)	35
Figura 2-38 Estaca anclada en el suelo con acelerómetros dispuestos para medir las direcciones longitudinal, transversal y vertical	36
Figura 2-39 S594 en circulación	37
Figura 3-1 Aceleraciones en el dominio del tiempo producidas por el S103 a una distancia de 5 m en Arroyo de las Piedras	40
Figura 3-2 Aceleraciones en el dominio de la frecuencia producidas por el S103 a una distancia de 5 m en Arroyo de las Piedras	41
Figura 3-3 Índice Law calculado a partir de las vibraciones producidas por el S103 a una distancia de 5 m en Arroyo de las Piedras	43
Figura 3-4 Bandas de tercio de octava de las vibraciones producidas por el S103 a una distancia de 5 m en Arroyo de las Piedras	44
Figura 4-1 Aceleración máxima frente a la distancia del acelerómetro	49
Figura 4-2 Índice Law frente a la distancia del acelerómetro	50
Figura 4-3 Índice K frente a la distancia del acelerómetro	51
Figura 4-4 Aceleración máxima frente a velocidad de paso del tren	53
Figura 4-5 Índice Law frente a velocidad de paso del tren	54
Figura 4-6 Índice K frente a velocidad de paso del tren	55
Figura 4-7 Aceleración máxima frente al coeficiente cs del suelo	58
Figura 4-8 Índice Law frente al coeficiente cs del suelo	59
Figura 4-9 Índice K frente al coeficiente cs del suelo	60
Figura 4-10 Índice Law frente al tipo de tren (en azul la media)	62

Figura 4-11 Índice Law frente a la distancia al acelerómetro en el ensayo en arroyo de las piedras	65
Figura 4-12 Índice de Law frente a la distancia al acelerómetro y velocidad de paso en el ensayo de Bruselas	68
Figura 4-13 Índice de Law frente a la distancia al acelerómetro y velocidad de paso en el ensayo de Córdoba	72
Figura 4-14 Índice Law frente a la distancia al acelerómetro y velocidad de paso en el ensayo de Reugny	73
Figura 4-15 Índice Law frente al coeficiente cs del terreno y velocidad de paso, para una distancia de 15m	75
Figura 4-16 Índice Law frente al coeficiente cs del terreno y la distancia del acelerómetro, para una velocidad de 50km/h	77
Figura 4-17 Índice Law frente al coeficiente cs del terreno y la distancia del acelerómetro, para una velocidad de 100km/h	78
Figura 4-18 Aceleración máxima frente al coeficiente cs del terreno y la distancia del acelerómetro, para una velocidad de 250km/h	79

1 INTRODUCCIÓN

En estos últimos años se está produciendo un gran desarrollo de las infraestructuras ferroviarias en el estado español, cosa que se traduce en un incremento tanto del número de vías ferroviarias como de la frecuencia del paso de trenes por las ya existentes. Este hecho, que supone un desarrollo de la sociedad del bienestar, tiene como contrapartida el problema de la contaminación ambiental en forma de ruido y vibraciones. Las vibraciones provocadas por el paso de los trenes son importantes porque pueden provocar desperfectos en edificios adyacentes al trazado de la vía. Estos defectos pueden ser causados tanto por la vibración inducida como por las vibraciones transmitidas directamente a las estructuras.

Un claro ejemplo de esto es el caso de la estación de Getafe centro, en Madrid, en la cual se tuvieron que tomar medidas para acabar con las vibraciones en las viviendas cercanas (medidas que alcanzaban el coste de tres millones de euros). En este caso, los vecinos, no conformes con las obras, pidieron la reducción de la velocidad de paso del tren de 50 km/h a 80km/h, pero, ¿sería efectivo el reducir la velocidad del tren?, o ¿puede que al reducir la velocidad aumente el nivel de las vibraciones?

Por otro lado, a la hora de estudiar las vibraciones producidas por el paso de un tren existen distintos índices de vibración que se pueden utilizar. Por un lado está el Índice Law, que es el usado por la Ley de ruido, Real Decreto 1367/2007, y por otro lado se encuentra el Índice K, de la ISO 2631-2(edición de 1989).

El objetivo de este trabajo es establecer una relación entre distintas variables y el nivel de vibraciones producido por el paso de un tren.

Para llevar a cabo el estudio se han tomado resultados de distintos ensayos, en los que se midieron las aceleraciones producidas por el paso de un tren. Al tener una gran cantidad de mediciones tan diferentes (trenes con distinta velocidad, suelo con distinta velocidad de propagación de ondas, distintas distancias de la vía, etc.), podemos establecer relaciones con distintas variables. Las variables que se van a estudiar son la distancia de la vía, la velocidad de paso del tren, la velocidad de propagación de ondas del suelo y el tipo de tren. Todos estos parámetros de cada ensayo se presentan en el capítulo 2. Todos estos datos de los ensayos han tenido que ser ordenados en función de las distintas variables para poder luego establecer conclusiones.

En el capítulo 3 se expone el desarrollo seguido en el tratamiento de los datos. Después de ordenar todos los resultados de los ensayos en función de las variables que se van a estudiar, se ha procedido al tratamiento de los datos, para establecer los indicadores del nivel de vibración que se van a usar. Los elegidos han sido la aceleración máxima, el Índice Law y el Índice K.

En el capítulo 4 se han representados estos indicadores del nivel de vibración en función de las distintas variables, para poder establecer conclusiones que permitan ver cómo varían las vibraciones en función de las variables estudiadas.

Por último, en el capítulo 5 se exponen las conclusiones que se han podido obtener del estudio.

MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO Y OBJETIVOS

Debido a la importancia del transporte ferroviario, ya sea de pasajeros o de mercancías, en la actualidad, es de gran interés la problemática de las vibraciones producidas por el paso de trenes.

El objetivo de este estudio es conocer la influencia de distintas variables en las vibraciones, para, por ejemplo, conocer a que distancia de una determinada vía de tren se podría construir, dependiendo de las velocidades de paso por esa vía, el tipo de suelo y otras variables.

Por otro lado, en este estudio se van a comparar diferentes índices de nivel de vibración y se va a poder sacar conclusiones para saber que índice es el indicado en cada comparación.

Para todo esto es necesario conocer los índices indicadores de nivel de vibración para luego poder establecer relaciones entre los distintos parámetros que pueden influir en el nivel de las vibraciones.

2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

2.1 Introducción

Para llevar a cabo este estudio estadístico de las vibraciones producidas por el paso de trenes se han tomado los datos de una serie de ensayos que fueron realizados entre 1997 y 2016 para la elaboración de distintos estudios, como se podrá observar en la exposición de cada ensayo en este mismo capítulo.

Estos ensayos fueron realizados en distintos emplazamientos de dentro y fuera de España, siendo realizados en:

- Bruselas (Bélgica). Ensayos realizados para la elaboración de “Free field vibration measurements during the passage of a Thalys high speed train” de Geert Degrande.
- Arroyo de las Piedras (provincia de Málaga). Ensayos realizados para la elaboración de “Predicción, medida experimental y evaluación de las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario” de Antonio Romero Ordóñez.
- Córdoba. Ensayos realizados para la elaboración de “Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía” de Pedro Galvín Barrera.
- Écija (provincia de Sevilla). Ensayos realizados para la elaboración de “Vibraciones ocasionadas en el suelo por el paso de una locomotora”, de P. Galvín y J. Domínguez.
- Orense. Ensayos realizados para un estudio vibratorio de carácter experimental realizado en el ámbito del proyecto de construcción de la Línea de Alta Velocidad Madrid – Galicia, tramo Pedralba de la Pradería – Ourense (Fase I – Pedralba de la Pradería – Taboadela), realizados por Pedro Galvín Barrera, Antonio Romero Ordóñez, María Dolores Martínez Rodrigo, Francisco Javier Cruz Muñoz y Lucía Mateo Sánchez.
- Palencia. Ensayos realizados para un estudio vibratorio de carácter experimental realizado en el ámbito del proyecto de construcción de la Línea de Alta – Velocidad Madrid – Asturias, en concreto para el tramo Palencia – León, realizados por Pedro Galvín Barrera, Antonio Romero Ordóñez, Carmen Pérez Alors, María Dolores Martínez Rodrigo y Damián Losa Baur.
- Reugny (Francia). Ensayos realizados para la elaboración de “Prediction of railway induced vibrations at a site in Reugny (France)” de Geert Lombaert, Pedro Galvín y Geert Degrande.
- Saint-Épain (Francia). Ensayos realizados para la elaboración de “Prediction of railway induced vibrations at a site in Saint-Épain (France)” de Geert Lombaert, Pedro Galvín y Geert Degrande.
- Zamora. Ensayos realizados para un estudio vibratorio de carácter experimental realizado en el ámbito del proyecto de construcción de la Línea de Alta Velocidad Madrid – Galicia, Tramo Zamora – Pedralba de la Pradería, realizados por Pedro Galvín Barrera, Antonio Romero Ordóñez, María Dolores Martínez Rodrigo y Francisco Javier Cruz Muñoz.

En esta sección se procede a presentar los ensayos de los que se extrajeron los datos que se van a utilizar para el análisis.

2.2 Bruselas

En diciembre de 1997 tuvieron lugar los ensayos en la línea de alta velocidad Bruselas-París para el Thalys HST mientras se desplazaba a una velocidad comprendida entre 160 y 330 km/h. Los ensayos fueron realizados a 55 km de la ciudad de Bruselas para la elaboración de “Free field vibration measurements during the passage of a Thalys high speed train” de Geert Degrande.

Los ensayos fueron realizados por L. Schillemans de Technum n.v., con la asistencia de K. Peeraer, P.Godart, W. Bontinck y por W.Dewulf.

El objetivo de este estudio era ilustrar el fenómeno producido por el paso de un tren de alta velocidad y las vibraciones producidas en el suelo y en la vía, además de recoger datos para validar numéricamente modelos de predicción numéricos de vibraciones producidas por un tren.

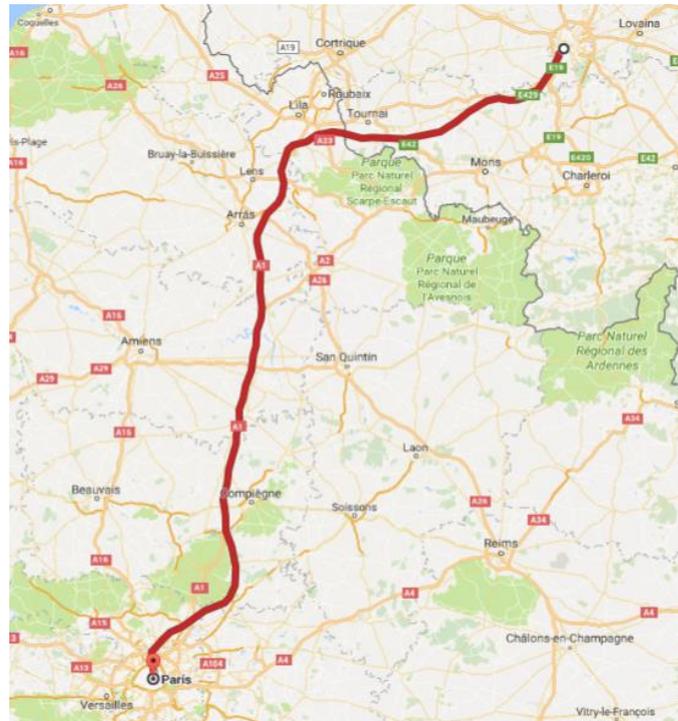


Figura 2-1 Planta de la vía París-Bruselas

2.2.1 La vía

La vía del HST entre Bruselas y París se trata de una vía de balasto clásica. Los carriles son de la tipología UIC-60, con 60kg/m de masa por unidad de longitud y con un momento de inercia de $0.3038e-4m^4$ fijadas con clip Pandroll E2039. El sistema de fijación está formado por traviesas monobloque de hormigón pretensado de longitud 2.5 m, 0.285 de ancho, altura 0.205 y de 300kg de masa. Consta también de una placa de asiento de 0.01 m de espesor.



Figura 2-2 Vía del Thalys HST entre Bruselas y París. Degrande, G. 2002. “Free field vibration measurements during the passage of a Thalys high speed train”

2.2.2 El suelo

Las propiedades dinámicas del suelo fueron determinadas a partir de ensayos de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) que se realizaron en ocho puntos situados entre 2m y 48m. Se generó una excitación transitoria al dejar caer una masa de 110 kg desde una altura de 0.9 m sobre una base de acero cuadrada de 0.7x0.7m con una masa de 600 kg. Posteriormente, a partir de la respuesta medida, se realizó el análisis de las ondas de superficie originadas por la excitación y, mediante un proceso de inversión, se minimizó la diferencia entre la curva de dispersión experimental y la teórica (figura 2.3).

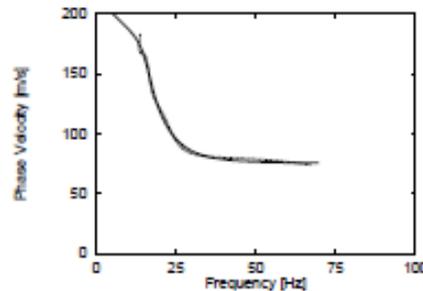


Figura 2-3 Comparación entre la curva experimental (discontinua) y la curva teórica (continua). Degrande, G. 2002. “Free field vibration measurements during the passage of a Thalys high speed train”

Para caracterizar el terreno también es necesaria una estimación del coeficiente de amortiguamiento interno. Según el ensayo SASW el suelo no era homogéneo, por lo que se esperaba un coeficiente de amortiguamiento que variara con la profundidad. Sin embargo, para reducir la complejidad del problema, se ha usado la fórmula de Barkan para un suelo homogéneo. Esta expresión relaciona la amplitud de vibración de un punto de un semiespacio homogéneo a una distancia r de la fuente con la de otro punto usado como referencia y situado a una distancia r_0 .

$$u^\eta(r) = u^\eta(r^0) \left(\frac{r}{r^0}\right)^{-n} \exp\left(\frac{-2\pi\xi}{\lambda_R}(r - r^0)\right) \quad (2-1)$$

donde n representa el amortiguamiento por radiación en el suelo y donde λ_R representa la longitud de onda de Rayleigh del terreno.

Con todos estos ensayos y análisis se ha caracterizado el terreno de la siguiente forma:

Tabla 2-1 Perfil del terreno del ensayo de Bruselas

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	1.4	80	0.03
2	1.9	133	0.03
3	inf	226	0.03

2.2.3 Medidas in situ

Las vibraciones producidas por los trenes se registraron con un sistema TEAC de 14 canales. Los datos se muestrearon a 1000 Hz. Las aceleraciones se midieron usando acelerómetros de tipo sísmico Dytran 3100A25. Las aceleraciones en carril, traviesa y estructura se midieron con acelerómetros PCB 393C.



Figura 2-4 Acelerómetro situado en carril y traviesa (izquierda) y acelerómetro situado sobre estaca de aluminio (derecha). Degrande, G. 2002. “Free field vibration measurements during the passage of a Thalys high speed train”

Cuatro de los acelerómetros fueron situados en el carril, las traviesas y la estructura y los otros diez se situaron a 4m, 6m, 8m, 12m, 16m, 24m, 32m, 40m, 56m y 72m.

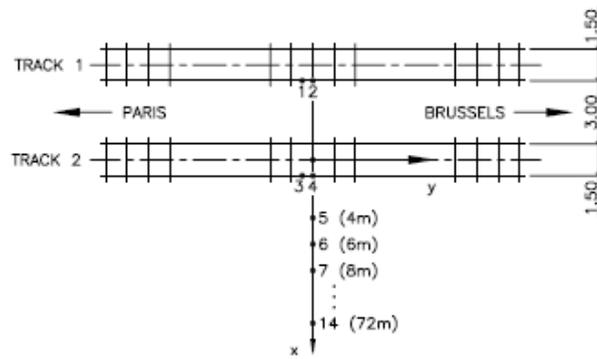


Figura 2-5 Localización de los puntos de medida. Degrande, G. 2002. “Free field vibration measurements during the passage of a Thalys high speed train”

2.2.4 Trenes

Las aceleraciones han sido medidas al paso del Thalys HST nueve veces todas ellas a distintas velocidades. El Thalys HST se corresponde con el modelo S100 español, por lo que a la hora de efectuar el estudio lo vamos a estudiar como el S100



Figura 2-6 Tren Thalys HST en circulación

El S100 está formado por dos locomotoras y ocho vagones. La longitud total del tren es de 200.18 m. Las locomotoras están soportadas por dos bogies y cuatro ejes. Los vagones que se encuentran junto a la locomotora comparten un bogie con el vagón vecino, mientras que los otros seis vagones comparten los dos bogies, por lo que el número total de bogies es de 13 y el número total de ejes es de 26.

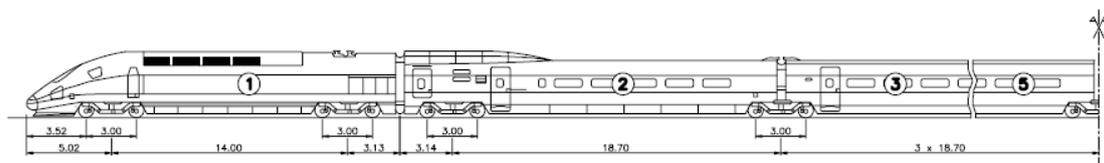


Figura 2-7 Configuración del tren S100. Degrande, G. 2002. “Free field vibration measurements during the passage of a Thalys high speed train”

En la siguiente tabla se muestran las características geométricas y másicas del S100.

Tabla 2-2 Características geométricas y másicas del S100

Tipo vagón	#Vagones	#Ejes	L_t [m]	L_b [m]	L_a [m]	M_t [kg]
Locomotora	2	4	22.15	14.00	3	17000
Vagón exterior	2	3	21.84	18.70	3	14500
Vagón interior	6	2	18.7	18.70	3	17000

Siendo L_t la longitud del vagón, L_b la distancia entre bogies, L_a la distancia entre ejes y M_t la masa por eje.

Por último, se muestran las velocidades de paso del tren cuando se realizaba el ensayo.

Tabla 2-3 Velocidades de paso del tren en los ensayos de Bruselas

Tren	Velocidad de paso [km/h]
S100	160
S100	160
S100	160
S100	250
S100	250
S100	300
S100	200
S100	200
S100	200

2.3 Arroyo de las piedras

El 18 de diciembre de 2007 tuvieron lugar los ensayos en el viaducto sobre el Arroyo de las Piedras (en el PK 118.374) que se encuentra en el municipio de Álora de la provincia de Málaga de la línea de alta velocidad Córdoba-Málaga. Se trata de un viaducto de tablero mixto de 1280m, proyectado en 20 vanos de longitud máxima 63.50m. Está soportado por 19 pilas de distintas alturas comprendidas entre 18m y 94m.

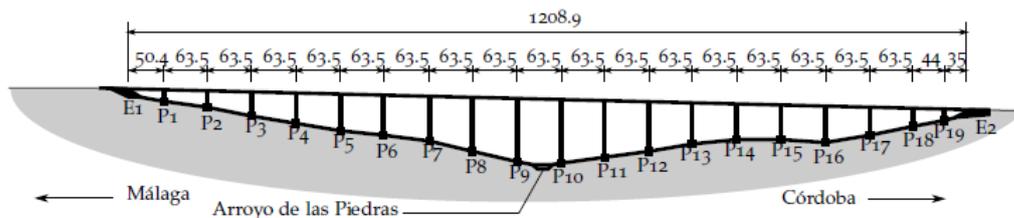


Figura 2-8 Representación del viaducto sobre el Arroyo de las Piedras. Romero, A. 2012 “Predicción, medida experimental y evaluación de las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario”

Los ensayos se realizaron en tres pasadas de un AVE S103 y se realizaron para la elaboración de “Predicción, medida experimental y evaluación de las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario”, tesis doctoral de Antonio Romero Ordóñez. Los ensayos fueron realizados por un grupo de investigadores de la universidad de Sevilla después de que ADIF les otorgara los permisos necesarios. El objetivo de los ensayos dentro de la tesis de Antonio Romero es el estudio experimental de las vibraciones producidas por el paso de un tren de alta velocidad

2.3.1 Medidas in situ

Las vibraciones producidas por los trenes se registraron con un sistema PULSE 3560C. Los datos se muestrearon a 4096 Hz. Las aceleraciones en la pila se registraron utilizando un acelerómetro Endevco 4370, se fijaron a la pila con una chapa con vástago roscado. Las aceleraciones en la superficie del suelo se midieron con acelerómetros Endevco 86 y geófonos Pinocchio AX150 montados sobre cubos de acero anclados al suelo mediante estacas metálicas y bases auto-niveladoras.

Dos de los acelerómetros fueron situados en la pila y los otros ocho se situaron a 1m, 3m, 5m, 8m, 10m, 15m, 25m y 35m.

2.3.2 Trenes

Las aceleraciones han sido medidas al paso del AVE S103.



Figura 2-9 AVE S103 en circulación. Romero, A. 2012 “Predicción, medida experimental y evaluación de las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario”

El AVE S103 es un tren de alta velocidad con tracción distribuida, lo que significa que tiene bogies con tracción repartidos por todo el tren, consiguiendo de este modo un mejor aprovechamiento del espacio del tren al no tener 2 cabezas tractoras como las series 100, 102 o 112, mejor aprovechamiento de la energía y mayor aceleración.

Está formado por una composición de 8 vagones de pasajeros (M-R-M-R+R-M-R-M) con una longitud total de 200m y una disposición de los ejes $Bo'Bo'+2'2'+Bo'Bo'+2'2' + 2'2'+Bo'Bo'+2'2'+Bo'Bo'$

En la tabla 2.4 podemos ver las características geométricas y másicas de este tren.

Tabla 2-4 Características geométricas y másicas del AVE S103

Tipo vagón	#Vagones	#Ejes	L_t [m]	L_b [m]	L_a [m]	M_t [kg]
Vagón final (tracción)	2	4	25.84	17.4	2.5	15310
Vagón central (tracción)	2	4	24.8	17.4	2.5	15470
Vagón central	4	4	24.8	17.4	2.5	14930

Siendo L_t la longitud del vagón, L_b la distancia entre bogies, L_a la distancia entre ejes y M_t la masa por eje.

Por último, se muestran las velocidades de paso del tren cuando se realizaba el ensayo.

Tabla 2-5 Velocidades de paso del tren en los ensayos del Arroyo de las Piedras

Tren	Velocidad de paso [km/h]
S103	252
S103	252
S103	252

2.4 Córdoba

Los días 15 y 29 de noviembre y el 19 de diciembre de 2006 tuvieron lugar los ensayos en el punto kilométrico 22.1 de la línea de alta velocidad Córdoba-Málaga (línea diseñada para una velocidad de 350 km/h). Los ensayos fueron realizados para la elaboración de “Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía” de Pedro Galvín Barrera.

Los ensayos se realizaron con distintos tipos de trenes (AVE-Talgo, AVE-Alstom y locomotora 252) mientras que se desplazaban a diferentes velocidades.

2.4.1 La vía

Se trata de una vía de balasto con carriles UIC -60, con 60kg/m de masa por unidad de longitud y con un momento de inercia de $0.3038e-4m^4$. El sistema de fijación está formado por traviesas prefabricadas de hormigón pretensado de longitud 2.5 m, ancho de 0.285m, altura 0.205, con una separación de 0.6m y de 300 kg de masa.

Esta expresión relaciona la amplitud de vibración de un punto de un semiespacio homogéneo a una distancia r de la fuente con la de otro punto usado como referencia y situado a una distancia r_0 .

$$u^\eta(r) = u^\eta(r_0) \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-n} \exp\left(\frac{-2\pi\xi}{\lambda_R}(r - r_0)\right) \quad (2-2)$$

donde n representa el amortiguamiento por radiación en el suelo y donde λ_R representa la longitud de onda de Rayleigh del terreno.

Se han ajustado las amplitudes de vibración medidas durante el ensayo SASW en los ocho puntos de la superficie del terreno utilizando la ecuación anterior, de manera que se ha obtenido el coeficiente de amortiguamiento del suelo para un semiespacio homogéneo con un comportamiento similar al del terreno en el cual se registraron las vibraciones inducidas por el tráfico ferroviario. El ajuste de la curva proporciona el coeficiente de amortiguamiento interno del suelo.

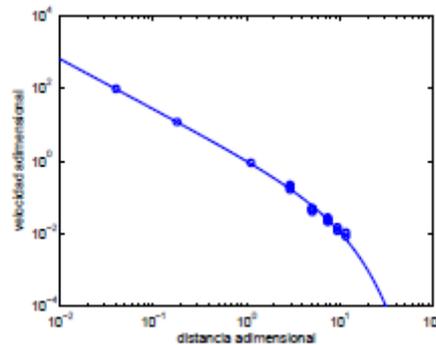


Figura 2-12 . Atenuación de la amplitud de vibración en el terreno. Galvín, P. 2007, “Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía”

Con todos estos ensayos y análisis se ha caracterizado el terreno de la siguiente forma:

Tabla 2-6 Perfil del terreno del ensayo de Córdoba

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	C_p [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	1.2	150	280.6	0.02
2	2.5	408.4	280.6	0.02
3	inf	635	280.6	0.02

2.4.3 Medidas in situ

Las vibraciones producidas por los trenes se registraron con un sistema PULSE de 12 canales. Los datos se muestrearon a 1024 Hz y se usó un filtro antialiasing a 512 Hz. Las aceleraciones se midieron usando acelerómetros de tipo sísmico Endevco 86 de sensibilidad 1000mV/s^2 montados sobre cubos de acero que se encontraban anclados al suelo mediante estacas de latón de 30 cm. Las aceleraciones en carril, traviesa y estructura se midieron con acelerómetros Endevco 4381 de sensibilidad 10pC/m/s^2 .



Figura 2-13 Acelerómetro adherido a carril y traviesas (izquierda) y acelerómetro sísmico (derecha). Galvín, P. 2007, “Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía³”

Tres de los acelerómetros fueron situados en el carril, las traviesas y la estructura y los otros nueve se situaron a 3m, 8.6m, 11.8m, 14.8m, 18.1m, 21.8m, 25m, 28.4m y 32.3m.

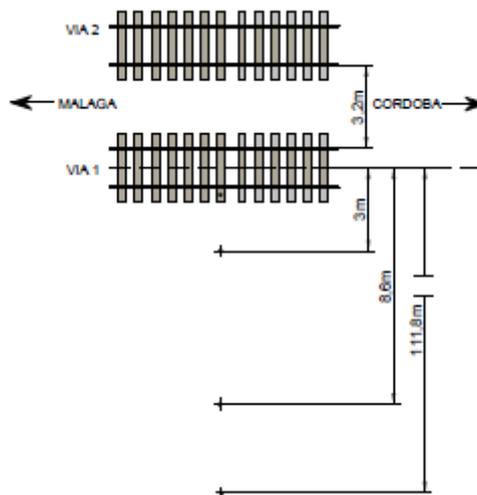


Figura 2-14 Localización de los puntos de medida en el ensayo de Córdoba. Galvín, P. 2007, “Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía³”

2.4.4 Trenes

Las aceleraciones han sido medidas al paso de tres trenes distintos: el AVE-Alstom (S100), el AVE-Talgo y la Locomotora 252. Las vibraciones fueron medidas para distintas velocidades de estos trenes, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 2-7 Velocidades de paso de la Locomotora 252 (L252), el S100 y el AVE Talgo (TALG) en los ensayos de Córdoba

Tren	Velocidad de paso [km/h]
L252	160
L252	160
L252	160
S100	250
S100	250
S100	300
TALG	200

El AVE-Alstom presenta las mismas características que el Thalys de Bruselas, ya que los dos son el modelo S100.

El Talgo está formado por dos ramas, una con 9 vagones y otra de 11 vagones, remolcados por una locomotora 252. Las locomotoras 252 se apoyan en dos bogies (cada uno con dos ejes), soportando cada eje una masa igual a $M_t=22500\text{kg}$. Por otro lado, los vagones de los trenes Talgo comparten todos sus bogies (cada uno con un solo eje). La longitud total de los vagones es $L_t=13.14\text{m}$, y la masa soportada por eje y por vagón es igual a $M_t=11700\text{kg}$.

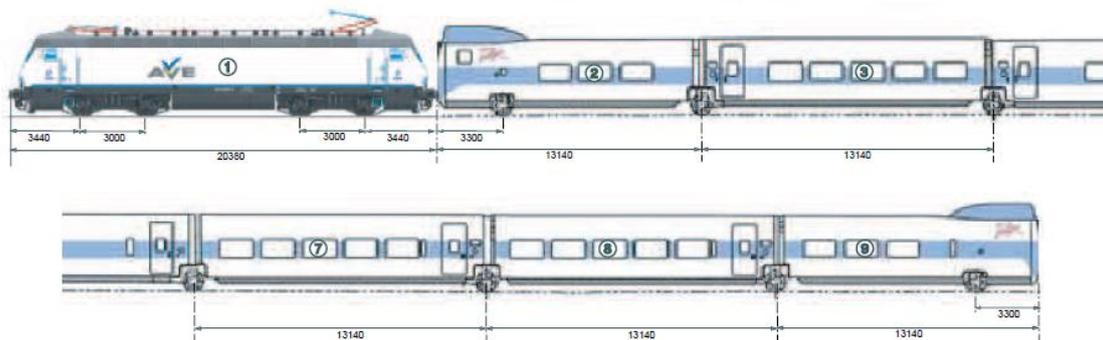


Figura 2-15 Configuración del tren AVE-Talgo. Galvín, P. 2007, “Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía³⁷”

Por otro lado, la locomotora 252 tiene las características descritas en el apartado anterior: dos bogies (cada uno con dos ejes), soportando cada eje una masa igual a $M_t=22500\text{kg}$

La disposición de ejes es Bo'Bo'



Figura 2-16 Locomotora 252

2.5 Écija

El 14 de febrero de 2006 tuvieron lugar los ensayos cerca de Los Algarbes (cerca de la localidad sevillana de Écija), 35 km de Córdoba, entre los puntos kilométricos 210+100 y 210+500 de la vía de alta velocidad Córdoba-Málaga.

Los ensayos fueron realizados para la elaboración de “Vibraciones ocasionadas en el suelo por paso de locomotora” de P. Galvín y J. Domínguez, estudio que tenía como objetivo validar un modelo analítico para predecir las vibraciones debidas al paso de trenes de alta velocidad, basado en el método de los elementos de contorno.

Los ensayos se realizaron con una Locomotora Serie 58.

2.5.1 La vía

Se trata de una vía de balasto con carriles UIC -60, con 60kg/m de masa por unidad de longitud y con un momento de inercia de $0.3038e-4\text{m}^4$. El sistema de fijación está formado por traviesas prefabricadas de hormigón pretensado de longitud 2.5 m, ancho de 0.285m, altura 0.205 y de 300 Kg de masa.



Figura 2-17 Vía de la línea de alta velocidad entre Córdoba y Málaga. Galvín, P., Domínguez, J.,2006, “Vibraciones ocasionadas en el suelo por paso de locomotora”

2.5.2 Medidas in situ

Las vibraciones producidas por los trenes se registraron con un sistema PULSE de 12 canales. Los datos se muestrearon a 1024 Hz. Se usaron dos configuraciones distintas. En la primera configuración las aceleraciones se midieron usando acelerómetros de tipo sísmico Endevco modelo 4370 y modelo 4381 junto con acondicionadores Endevco tipo 2647 para medir aceleraciones en el carril y en las traviesas. Tres de los acelerómetros fueron situados en el carril, las traviesas y la estructura y los otros nueve se situaron a 2m, 3.3m, 3.9m, 4.8m, 7.5m, 9.6m, 11.5m, 13.9m y 15.9m.

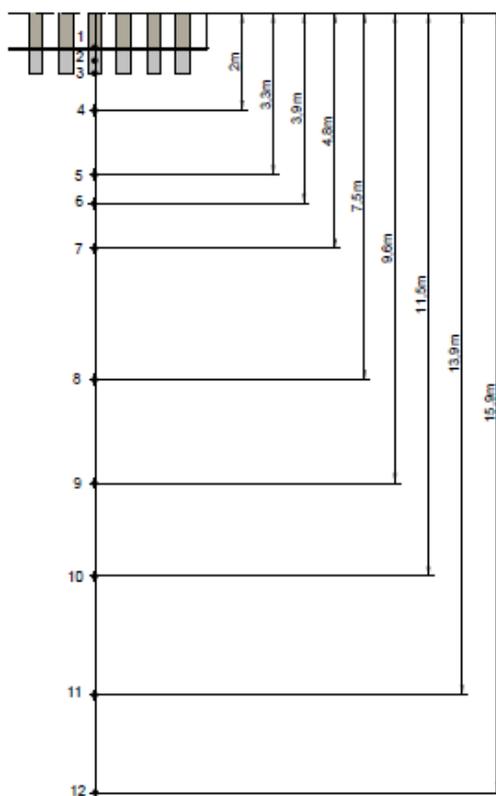


Figura 2-18 Localización de los puntos de medida de la primera configuración (Écija). Galvín, P., Domínguez, J.,2006, “Vibraciones ocasionadas en el suelo por paso de locomotora”

Por otro lado, se usó otra configuración en la que, además de aceleraciones verticales, se midieron aceleraciones longitudinales y transversales. Se mantuvieron los acelerómetros localizados en el carril y en las traviesas, y se midieron las aceleraciones en las tres direcciones en puntos situados a 4m y 8.2m del centro de la vía, y sólo las verticales en puntos situados a 2.7m, 10.3m y 14.6m del centro de la vía.



Figura 2-19 Acelerómetros adheridos a carril y traviesas (izquierda) y acelerómetro sísmico (derecha). Galvín, P., Domínguez, J.,2006, “Vibraciones ocasionadas en el suelo por paso de locomotora”

2.5.3 Trenes

Las aceleraciones han sido medidas al paso la Locomotora Serie 58.



Figura 2-20 Locomotora Serie 58. Galvín, P., Domínguez, J.,2006, Galvín, P., Domínguez, J.,2006, “Vibraciones ocasionadas en el suelo por paso de locomotora”

La locomotora serie 58 pesa 130 t y tiene una longitud total de 19.3, siendo soportada esta por dos bogies y seis ejes. La distancia entre ejes que comparte bogie es de 2.1m, y la distancia entre bogies es 10.7m

Las vibraciones fueron medidas para distintas velocidades de la locomotora Serie 58, se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 2-8 Velocidades de paso de la Locomotora Serie 58 (LS58)

Tren	Velocidad de paso [km/h]
LS58	20
LS58	40
LS58	60
LS58	60
LS58	60
LS58	80
LS58	80
LS58	20
LS58	40
LS58	60
LS58	60
LS58	60

2.6 Orense

Los días comprendidos entre el 18 y el 22 julio de 2016 tuvieron lugar los ensayos en la línea de alta velocidad Madrid-Galicia, en el tramo Pedralba de la Pradería-Orense. Se realizaron en tres zonas llamadas subtramo 4 (situado en la localidad de Portocamba), subtramo 6 (situado en la localidad de Miaman) y subtramo 7 (situado entre las localidades de Ponte de Abaixo y Pumares).



Figura 2-21 Localización de los ensayos realizados en el subtramo 4. “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Galicia”.



Figura 2-22 Localización de los ensayos realizados en el subtramo 6. “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Galicia”



Figura 2-23 Localización de los ensayos realizados en el subtramo 7. “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Galicia”

Los ensayos fueron realizados para un estudio vibratorio de carácter experimental realizado en el ámbito del proyecto de construcción de la Línea de Alta Velocidad Madrid – Galicia, tramo Pedralba de la Pradería – Ourense (Fase I – Pedralba de la Pradería – Taboadela), realizados por Pedro Galvín Barrera, Antonio Romero Ordóñez, María Dolores Martínez Rodrigo, Francisco Javier Cruz Muñoz y Lucía Mateo Sánchez.

Los ensayos se realizaron al paso de distintos S730 y de un tren de mercancías.

2.6.1 El suelo

Las propiedades dinámicas del suelo fueron determinadas a partir de ensayos de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) y del método sísmico de refracción. Para ambos se ha utilizado la respuesta vertical del suelo ocasionada por una serie de cargas impulsivas.

Los ensayos de caracterización dinámica del suelo se realizaron en el subtramo 4 y en el subtramo 7.

En el subtramo 4 los ensayos se realizaron en el P.K. 310+300, a las afueras de la localidad de Portocamba. En este caso, el acelerómetro más cercano a la cimentación se encontraba a 2m y el más alejado a 72 m. Entre ellos se colocaron 34 acelerómetros situados cada 2m.



Figura 2-24 Equipo utilizado para producir las cargas impulsivas para la caracterización del terreno. “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Galicia”

Gracias a los acelerómetros situados cerca del impacto se pudo obtener la respuesta en el dominio de la frecuencia y del tiempo. Después, a partir del proceso de minimización se obtuvieron la velocidad de propagación de las ondas P y las ondas S y el coeficiente de amortiguamiento del terreno:

Tabla 2-9 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 4 (Orense)

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	C_p [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	1.7	122.3	689.8	0.2
2	1.7	215.1	1598.1	0.2
3	6.3	405.5	3588.1	0.2
4	inf	390.2	4627.5	0.2

En el subtramo 7 los ensayos se realizaron en el P.K. 600+220, entre las localidades de Pumares y Ponte Ambia. En este caso los ensayos se realizaron de la misma forma que en los ensayos del subtramo 4. Los resultados de este ensayo fueron los siguientes:

Tabla 2-10 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 7 (Orense)

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	C_p [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	1.5	217	828	0.1
2	2.5	406	1364	0.1
3	inf	1137	4040	0.06

2.6.2 Medidas in situ

Las vibraciones producidas por los trenes se registraron con acelerómetros triaxiales Kinematics modelo Etna de 9 canales. Los datos se muestrearon a 250 Hz. Las medidas se realizaron en tres direcciones.

Los acelerómetros fueron situados a distintas distancias en cada subtramo:

- Subtramo 4. Se situaron acelerómetros a 70, 77 y 81m.
- Subtramo 6. Se situó un acelerómetro a 69 m.
- Subtramo 7. Se situaron acelerómetros a 45,55 y 65m

2.6.3 Trenes

Las aceleraciones han sido medidas al paso de distintos trenes AVE S730 y un tren de mercancías.

El AVE S730 es un tren de altas prestaciones de ancho variable que está diseñado para realizar servicios tanto por líneas de alta velocidad como por líneas convencionales, e incluso por líneas no electrificadas. Cada tren consiste en una composición de la Serie 103 de Renfe a la que se le cambian los dos remolques extremos por sendos furgones generadores diésel entre las cabezas tractoras y los coches de viajeros. Estos furgones generan la electricidad necesaria para mover los motores eléctricos del tren y para mantener los servicios a bordo.



Figura 2-25 Tren AVE S730 en circulación

La composición del AVE S730 es: M+F+9R+F+M. Por otro lado, la disposición de los ejes es Bo'Bo'+2'1'1'1'1'1'1'1'1'2'+Bo'Bo'

Las vibraciones fueron medidas para distintas velocidades de paso del tren, como se puede observar en las siguientes tablas:

Tabla 2-11 Velocidades de paso en el subtramo 4

Tren	Velocidad de paso [km/h]
S730	38
S730	44
S730	55
S730	66

Tabla 2-12 Velocidades de paso en el subtramo 6

Tren	Velocidad de paso [km/h]
S730	48
S730	50

Tabla 2-13 Velocidades de paso en el subtramo 7

Tren	Velocidad de paso [km/h]
MERC	56
S730	83
S730	89
S730	95
S730	95
S730	105

2.7 Palencia

Los días comprendidos entre el 30 de marzo y el 10 de abril de 2011 tuvieron lugar los ensayos en la línea de alta velocidad Madrid-Galicia, en el tramo Palencia-León. Se realizaron en seis zonas, apodadas como 10A (situado en la localidad de Palanquinos), 10B (situado en la localidad de Grulleros), 10C (situado en Torneros de Bernesga), 11A (situado en la localidad de Trobajo de Cerecedo), 11B (situado en la localidad de Trobajo de Cerecedo) y 11C (situado en la localidad de León).

Los ensayos fueron realizados para un estudio vibratorio de carácter experimental realizado en el ámbito del proyecto de construcción de la Línea de Alta – Velocidad Madrid –Asturias, en concreto para el tramo Palencia – León, realizados por Pedro Galvín Barrera, Antonio Romero Ordóñez, Carmen Pérez Alors, María Dolores Martínez Rodrigo y Damián Losa Baur.



Figura 2-26 Localización de los ensayos en la zona 10^a. “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Asturias”



Figura 2-27 Localización de los ensayos en la zona 10B. “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Asturias”



Figura 2-28 . Localización de los ensayos en la zona 10C. “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Asturias”



Figura 2-29 Localización de los ensayos en la zona 11ª. “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Asturias”



Figura 2-30 Localización de los ensayos en la zona 11B. “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Asturias”



Figura 2-31 Localización de los ensayos en la zona 11C. “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Asturias”

2.7.1 El suelo

Las propiedades dinámicas del suelo fueron determinadas a partir de ensayos de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) y del método sísmico de refracción. Para ambos se ha utilizado la respuesta vertical del suelo ocasionada por una serie de cargas impulsivas. Los ensayos de caracterización dinámica del suelo se realizaron en todos los subtramos excepto en el 11C

Gracias a los acelerómetros situados cerca del impacto se pudo obtener la respuesta en el dominio de la frecuencia y del tiempo. Después, a partir del proceso de minimización se obtuvieron la velocidad de propagación de las ondas P y las ondas S y el coeficiente de amortiguamiento del terreno:

Tabla 2-14 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 10a

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	C_p [m/s]	Coeficiente de amortiguamiento
1	1.2	189	1412	0.06
2	2.9	189	1665	0.06
3	25	495	1756	0.05
4	23.6	440	1847	0.04
5	inf	342.2	1872	0.037

Tabla 2-15 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 10b

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	C_p [m/s]	Coeficiente de amortiguamiento
1	2.1	195	844	0.08
2	4.4	195	1224	0.07
3	1.35	590	1224	0.04
4	inf	514	1750	0.06

Tabla 2-16 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 10c

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	C_p [m/s]	Coeficiente de amortiguamiento
1	2.6	200	1361	0.08
2	2.6	209	1605	0.06
3	1.8	382	1737	0.036
4	inf	463	1737	0.03

Tabla 2-17 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 11a

Estrato	Espesor [m]	C _s [m/s]	C _p [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	3.5	245	842	0.07
2	1.6	245	1900	0.08
3	3.5	585	1900	0.06
4	inf	530	840	0.05

Tabla 2-18 Perfil del terreno del ensayo del subtramo 11b

Estrato	Espesor [m]	C _s [m/s]	C _p [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	2	407	1541	0.08
2	1.35	225	1753	0.07
3	2.34	285	1709	0.08
4	inf	637	1759	0.06

2.7.2 Medidas in situ

Las vibraciones en la dirección longitudinal, transversal y vertical producidas por los trenes se registraron usando acelerómetros modelo Endevco 86., acelerómetros modelo ENDEVCO 4370 junto con un acondicionador NEXUS de Brüel&Kjaer y geófonos Pinocchio AX150. Se usaron seis acelerómetros en cada subtramo, pero en algunos subtramos (11B y 11C) las distancias cambian para distintos trenes. Las distancias a las que se situaron los acelerómetros fueron:

Tabla 2-19 Distancias de los acelerómetros en los ensayos realizados en Palencia

Subtramo	Distancias de los acelerómetros [m]
10A	5,10,12,35,75
10B	5, 10, 15, 25, 35 ,45
10C	5, 10, 15, 25, 35,55
11A	5, 10, 15, 25, 30, 35
11B	35, 44, 52, 68, 70,78, 92, 96
11C	0, 15, 31,47

2.7.3 Trenes

Las aceleraciones han sido medidas al paso de distintos trenes.

Las vibraciones fueron medidas para distintas velocidades de paso del tren, como se puede observar en las siguientes tablas (siendo MERC un tren de mercancías, MEDI un tren de media distancia, REGI un tren regional, TALG el tren Arco de Renfe, S130 un Alvia y el tren de un hotel cercano a la zona 11C, que es un talgo, por lo que es TALG):

Tabla 2-20 Velocidades de paso en el subtramo 10A

Tren	Velocidad de paso [km/h]
MERC	55
MEDI	54
MEDI	102
MERC	94
REGI	23
MERC	65
REGI	59
TALG	37
MEDI	128
MERC	96
MEDI	121
S130	105
S130	72
MEDI	72

Tabla 2-21 Velocidades de paso en el subtramo 10B

Tren	Velocidad de paso [km/h]
MERC	54
MERC	66
S130	68
MEDI	65
S130	45
S130	53
TALG	50
REGI	61
MERC	30
REGI	67
TALG	71
MEDI	70
MERC	27
S130	104
S130	60
MEDI	69
S130	6
MERC	31
MERC	61

Tabla 2-22 Velocidades de paso en el subtramo 10C

Tren	Velocidad de paso [km/h]
S130	30
MERC	62
TALG	11
REGI	107
TALG	110
MEDI	107
S130	41
S130	24
MEDI	128
MEDI	110

Tabla 2-23 Velocidades de paso en el subtramo 11A

Tren	Velocidad de paso [km/h]
S130	28
S130	92
S130	125
MEDI	120
S130	49
S130	96
MERC	17
REGI	61
REGI	116
TALG	90
MERC	18
MEDI	56
S130	59

Tabla 2-24 Velocidades de paso en el subtramo 11B

Tren	Velocidad de paso [km/h]
MEDI	35
S130	70
REGI	68
S130	44
MEDI	52
MEDI	96
S130	92
REGI	78

Tabla 2-25 Velocidades de paso en el subtramo 11C

Tren	Velocidad de paso [km/h]
MEDI	0
REGI	0
MEDI	0
MEDI	0
REGI	0
MEDI	0
REGI	0
S130	0
S130	0
MEDI	0
S130	0
REGI	0
REGI	0
S130	0
S130	0
MEDI	0
REGI	0
S130	0
S130	0
TALG	0
TALG	0
REGI	0
REGI	0
TALG	0
REGI	0
REGI	0
TALG	0
REGI	0
REGI	0
MEDI	0
S130	0
TALG	0

2.8 Reugny

En el análisis también van a ser utilizados los datos obtenidos cerca de Reugny (Francia) entre los PK 202.860 y 203.000 en la línea LGV atlántica.

Los ensayos fueron realizados para la elaboración de “Prediction of railway induced vibrations at a site in Reugny (France)” de Geert Lombaert, Pedro Galvín y Geert Degrande.

Los ensayos se realizaron con tres trenes distintos: el TGVA (S100), el TGVA doble y el TGVD.



Figura 2-32 Línea atlántica LGV, donde se realizaron los ensayos. Lombaert, G., Galvín, P., Degrande, G., 2009, “Prediction of railway induced vibrations at a site in Reugny (France)”

2.8.1 La vía

La vía en Reugny es una vía de balasto clásica. Los carriles son de la tipología UIC-60, soportados por traviesas VAXU41 (traviesa bloque de hormigón) que tienen una longitud total de 2.41m y miden 0.84mx0.29mx0.22m y una masa total de 250kg.

2.8.2 El suelo

. Las propiedades dinámicas del suelo fueron determinadas a partir de ensayos de análisis espectral de ondas superficiales (SASW). Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 2-26 Perfil del terreno del ensayo en Reugny

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	C_p [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	2	211	451	0.05
2	inf	403	634	0.06

2.8.3 Medidas in situ

Los acelerómetros se situaron a 2m, 12m, 32m, 56m y 72m.

2.8.4 Trenes

Las aceleraciones han sido medidas al paso de tres trenes el TGV Atlantique (S100), el TGV doble (TGVS) y el TGV Duplex (TGVD).



Figura 2-33 TGV Duplex (TGVD)

El TGV tiene las mismas características del S100, cuyas características ya han sido descritas anteriormente.

Por otro lado el TGV Duplex (TGVD) fue construido para aumentar la capacidad de los TGV sin aumentar la longitud del tren ni el número de trenes. Cada remolque tiene dos pisos, con un único acceso a través de las puertas de la parte baja que se aprovechan de la baja altura de los andenes franceses. Estas composiciones miden 200.19 m de longitud y tienen un ancho de 2,9 m. Su masa es de 424 tm, están compuestas por dos cabezas motrices y ocho remolques de pasajeros. Pueden alcanzar una velocidad máxima de 320 km/h

La composición es M+8R+M y sigue la siguiente configuración:

Tabla 2-27 Características geométricas y másicas del TGV Duplex

Tipo vagón	#Vagones	#Ejes	L_t [m]	L_b [m]	M_c [kg]
Locomotora	2	4	22.15	14.00	54240
Vagones vecinos a la locomotora	2	3	21.84	18.70	26000
Vagones centrales	6	2	18.7	18.7	26000

Siendo L_t la longitud del vagón, L_b la distancia entre bogies y M_c la masa del vagón.

Se presentan ahora las velocidades de paso de estos trenes:

Tabla 2-28 Velocidad de paso de los trenes durante los ensayos en Reugny

Tren	Velocidad de paso [km/h]
S100	255
TGVS	256
TGVD	238

2.9 Saint-Épain

En el análisis también van a ser utilizados los datos obtenidos cerca de Saint-Épain (Francia) en la línea LC 570000 Paris-Burdeos entre los PK261.440-PK262.065.



Figura 2-34 Localización de los ensayos en Saint-Épain. Lombaert, G., Galvín, P., Degrande, G., 2009, “Prediction of railway induced vibrations at a site in Saint-Épain (France)”

Los ensayos se realizaron con cuatro trenes distintos: el TGVA (S100), el TGVA doble, un tren de mercancías y el TER tipo AGC.

Los ensayos fueron realizados para la elaboración de “Prediction of railway induced vibrations at a site in Saint-Épain (France)” de Geert Lombaert, Pedro Galvín y Geert Degrande.

2.9.1 La vía

La vía en Reugny es una vía de balasto clásica. Los carriles son de la tipología UIC-60, soportados por traviesas VAXU41 (traviesa bloque de hormigón) que tienen una longitud total de 2.41m y miden 0.84m x 0.29m x 0.22m y una masa total de 250kg.

2.9.2 El suelo

. Las propiedades dinámicas del suelo fueron determinadas a partir de ensayos de análisis espectral de ondas superficiales (SASW). Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 2-29 Perfil del terreno del ensayo en Saint-Épain

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	C_p [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	2.5	281	269	0.05
2	inf	493	580	0.05

2.9.3 Medidas in situ

Los acelerómetros se situaron a 2m, 12m, 32m, 56m y 72m

2.9.4 Trenes

Las aceleraciones han sido medidas al paso de cuatro trenes distintos: TGV Atlantique (S100), el TGVA doble (TGVS), el tren de mercancías (MERC) y el TER tipo AGC (TERA).

Se efectuaron dos medidas del tren de mercancías y en cada una de ellas tenía una configuración distinta.

El primero de ellos tenía dos locomotoras BB22200, 6 vagones Rilmms-R00 (tipo 1) y 20 vagones Sgss-S06 (tipo 2) y las siguientes características:

Tabla 2-30 Características geométricas y másicas del tren de mercancías en su primer paso

Tipo vagón	#Vagones	#Ejes	L_t [m]	L_b [m]	M_c [kg]
Locomotora	2	4	17.48	9.694	90000
Vagones tipo 1	6	4	14.04	9	20800
Vagones tipo 2	20	4	20.64	18.6	22000

Siendo L_t la longitud del vagón, L_b la distancia entre bogies y M_c la masa del vagón.

El segundo tren de mercancías tenía una locomotora BB22200, 22 vagones Hoper (tipo 3) y 4 vagones High-sided (tipo 4) y las siguientes características:

Tabla 2-31 Características geométricas y másicas del tren de mercancías en su segundo paso

Tipo vagón	#Vagones	#Ejes	L_t [m]	L_b [m]	M_c [kg]
Locomotora	1	4	17.48	9.694	90000
Vagones tipo 3	22	4	14.85	9.82	21600/59000
Vagones tipo 4	4	4	14.04	8.5	28000/52000

Siendo L_t la longitud del vagón, L_b la distancia entre bogies y M_c la masa del vagón.

El TER tipo AGC tenía dos locomotoras y diez vagones de pasajeros. Los dos vagones de pasajeros adyacentes a las locomotoras comparten un bogie con el vagón vecino, mientras que los otros vagones comparten los dos bogie. Este tren presenta las siguientes características:

Tabla 2-32 Características geométricas y másicas del TER tipo AGC

Tipo vagón	#Vagones	#Ejes	L_t [m]	L_b [m]	M_c [kg]
Locomotora	2	4	22.15	55790	55790
Vagones junto a locomotoras	2	3	21.84	24000	24000
Vagones centrales	8	2	18.7	24000	24000

Siendo L_t la longitud del vagón, L_b la distancia entre bogies y M_c la masa del vagón.

Se presentan ahora las velocidades de paso de estos trenes:

Tabla 2-33 Velocidad de paso de los trenes durante los ensayos en Saint-Épain

Tren	Velocidad de paso [km/h]
MERC	40
MERC	100
TERA	100
TGVM	200
TGVS	200

2.10 Zamora

Los días comprendidos entre el 1 y el 3 de mayo y los días comprendidos entre el 12 de junio y el 15 de junio de 2014 tuvieron lugar los ensayos en la línea de alta velocidad Madrid-Galicia, en el tramo Zamora- Pedralba de la Pradería. Se realizaron en tres zonas llamadas zona1 (situado en la localidad de Zamora), zona2 (situado en la localidad de Zamora también) y zona6 (situado en Puebla de Sanabria).

Los ensayos fueron realizados para un estudio vibratorio de carácter experimental realizado en el ámbito del proyecto de construcción de la Línea de Alta Velocidad Madrid – Galicia, Tramo Zamora – Pedralba de la Praderia, realizados por Pedro Galvín Barrera, Antonio Romero Ordóñez, María Dolores Martínez Rodrigo y Francisco Javier Cruz Muñoz.



Figura 2-35 Localización de los ensayos en la zona 1 (Zamora). “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Galicia”



Figura 2-36 Localización de los ensayos en la zona 2 (Zamora). “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Galicia”



Figura 2-37 Localización de los ensayos en la zona 6 (Zamora). “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Galicia”

Los ensayos se realizaron al paso de distintos S730, un tren de S594 y un Thalys.

2.10.1 El suelo

Las propiedades dinámicas del suelo fueron determinadas a partir de ensayos de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) y del método sísmico de refracción. Para ambos se ha utilizado la respuesta vertical del suelo ocasionada por una serie de cargas impulsivas. Los ensayos de caracterización dinámica del suelo se realizaron en todas las zonas.

Gracias a los acelerómetros situados cerca del impacto se pudo obtener la respuesta en el dominio de la frecuencia y del tiempo. Después, a partir del proceso de minimización se obtuvieron la velocidad de propagación de las ondas P y las ondas S y el coeficiente de amortiguamiento del terreno:

Tabla 2-34 Perfil del terreno del ensayo de la zona 1

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	C_p [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	4	190	540	0.09
2	inf	300	800	0.09

Tabla 2-35 Perfil del terreno del ensayo de la zona 2

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	C_p [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	3	204	660	0.42
2	inf	500	900	0.28

Tabla 2-36 Perfil del terreno del ensayo de la zona 6

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	C_p [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	1.7	168	305	0.12
2	inf	433	1500	0.05

2.10.2 Medidas in situ

La respuesta de la superficie del suelo se registró en las direcciones longitudinal, transversal y vertical usando acelerómetros modelo Endevco 86 y acelerómetros modelo PCB 393B31 dispuestos en 5 puntos del suelo mediante estacas de sección cruciforme. Los datos se muestrearon a 4096 Hz.



Figura 2-38 Estaca anclada en el suelo con acelerómetros dispuestos para medir las direcciones longitudinal, transversal y vertical. “Estudio vibratorio. Línea de alta velocidad Madrid-Galicia”

Las distancias a las que se dispusieron los acelerómetros son:

Tabla 2-37 Distancias de los acelerómetros en los ensayos realizados en Zamora

Zona	Distancias de los acelerómetros [m]
1	13, 25,55
2	0,20,22,40,50
6	10,20,30,40,50,70

2.10.3 Trenes

Las aceleraciones han sido medidas al paso de distintos trenes AVE S730, un tren de S594 y un Thalys (S100).

Las características del AVE S730 y del S100 ya han sido presentadas, por lo que se va a proceder a caracterizar el S594.

La Serie 594 de Renfe o TRD (Tren Regional Diésel) es una serie de trenes diésel especialmente diseñados para ofrecer un servicio de regionales denominado TRD. Tiene una longitud total de 47.348m, una anchura de 2,937m y una altura de 3.888m. El peso total es de 97 t. Tiene una composición M+M



Figura 2-39 S594 en circulación

Se presentan ahora las velocidades de paso de estos trenes para cada una de las zonas:

Tabla 2-38 Velocidad de paso de los trenes durante los ensayos en la zona 1 (Zamora)

Tren	Velocidad de paso [km/h]
S730	28
S730	48
S594	35
S730	31
S730	33

Tabla 2-39 Velocidad de paso de los trenes durante los ensayos en la zona 2(Zamora)

Tren	Velocidad de paso [km/h]
S730	25
S730	26
S730	27
S730	28
S730	30
S730	36
S730	29
S730	30
S730	31
S730	32
S730	29
S730	28
S730	28
S730	27
S730	27
S100	22

Tabla 2-40 Velocidad de paso de los trenes durante los ensayos en la zona 6 (Zamora)

Tren	Velocidad de paso [km/h]
S730	28
S730	25
S730	26
S730	12
S730	13
S730	22
S730	32
S730	15
S730	18

3 TRATAMIENTO DE DATOS

3.1 Introducción

Los datos obtenidos de los ensayos son las aceleraciones producidas por el paso de tren en el suelo. Estas aceleraciones son uno de los parámetros que se han tenido en cuenta para realizar el estudio, pero no son el único parámetro utilizado. Además de las aceleraciones se han utilizado el Índice K y el Índice Law, previo cálculo. En este capítulo se va a indicar el procedimiento seguido en el cálculo de estos parámetros de nivel de vibración, para ello se va a utilizar un caso concreto (la vibración producida por un tren a una única velocidad medido a una distancia concreta). El caso elegido es el de las vibraciones producidas en el ensayo de Arroyo de las Piedras por un tren S103 pasando a una velocidad de 252 km/h y medido a una distancia de 5 m. El procedimiento seguido con todos los demás casos es el mismo.

El cálculo se ha realizado en el programa de cálculo numérico Matlab, con el código del Anexo 1, elaborado para este trabajo.

En primer lugar hay que tener en cuenta que la frecuencia de muestreo no ha sido la misma en todos los ensayos, por lo que es un valor que se ha introducido manualmente para cada ensayo.

Por último, se ha tenido en cuenta que no todas las mediciones se realizaron en tres direcciones, si no que en algunos ensayos sólo se midieron las aceleraciones verticales. Esto es muy importante en el cálculo de los índices, ya que en el caso de las aceleraciones sólo usaremos las mediciones en la dirección vertical, mientras que en el cálculo de los índices si se tendrán en cuenta las otras dos mediciones en dirección horizontal.

3.2 Aceleración máxima

El primero de los parámetros usados para el estudio estadístico ha sido la propia aceleración máxima registrada al paso del tren.

Como se ha explicado en el capítulo anterior, los datos fueron registrados usando distintas frecuencias de muestreo, dependiendo del ensayo (como se expuso en el capítulo anterior).

Los datos registrados se han filtrado usando dos filtros digitales tipo Chebyshev con unas frecuencias de corte de 125 Hz y 3 Hz (filtro de paso bajo y filtro de paso alto) y orden 3 en ambos casos.

En este caso en concreto, se han utilizado sólo las mediciones realizadas en la dirección vertical, ya que carecería de sentido comparar una aceleración en dirección horizontal con una en la dirección vertical.

Primero se han representado todas las aceleraciones en el dominio del tiempo, de manera que los resultados obtenidos tienen la siguiente forma:

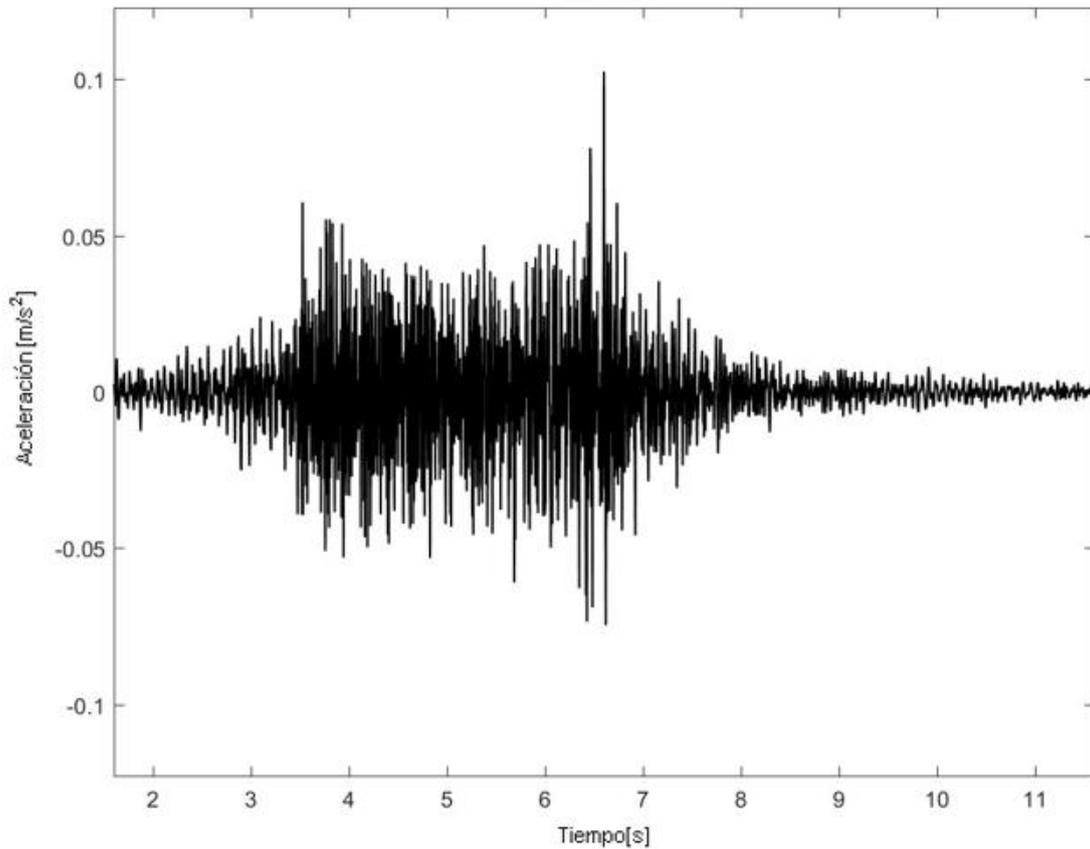


Figura 3-1 Aceleraciones en el dominio del tiempo producidas por el S103 a una distancia de 5 m en Arroyo de las Piedras

De todos estos valores el que es de interés para este parámetro de medición es el valor máximo de cada ensayo, para cada tren y de un acelerómetro en concreto, es decir, un caso de paso de tren a una distancia concreta, de manera que sea un punto en las posteriores representaciones.

Aunque no se haya usado en el estudio explícitamente, también se han calculado las aceleraciones en el dominio de la frecuencia usando la transformada rápida de Fourier (FFT). La transformada de Fourier es una operación matemática que transforma una señal en el dominio del tiempo a otra en el dominio de la frecuencia y viceversa. Siendo $h(t)$ una función en el dominio del tiempo y $H(f)$ una señal resultante de representar $h(t)$ en el dominio de la frecuencia se define la relación entre ellas mediante la transformada de Fourier como:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{2\pi ift} dt \quad \text{ec(3-1)}$$

De esta manera se obtuvieron resultados del tipo:

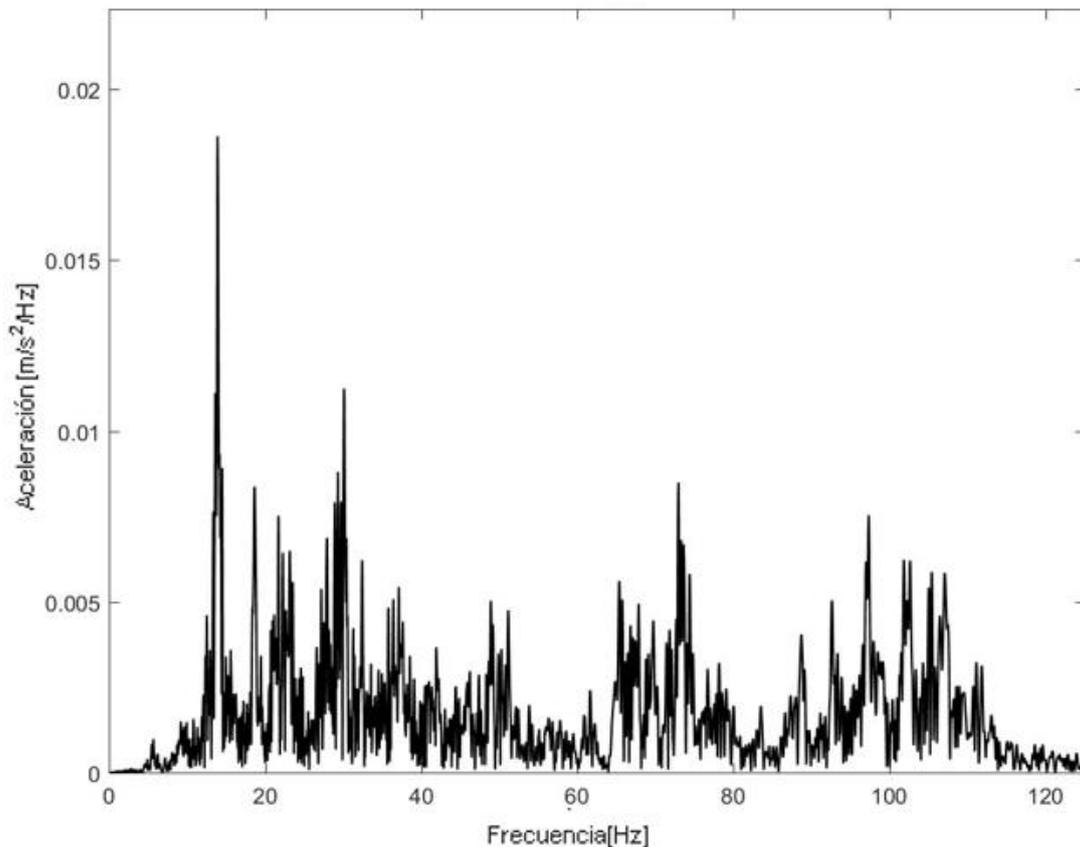


Figura 3-2 Aceleraciones en el dominio de la frecuencia producidas por el S103 a una distancia de 5 m en Arroyo de las Piedras

3.3 Índice Law

El segundo parámetro indicador del nivel de vibración que se ha usado para el estudio es el Índice Law.

El índice Law es “un índice de vibración asociado a la molestia, o a los efectos nocivos, producidos por vibraciones” según Real Decreto 1367/2007, del 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. Se trata de un índice obtenido por ponderación en frecuencia de la señal de aceleración medida durante un periodo de tiempo representativo de la perturbación vibratoria y por suma de energías en el dominio de la frecuencia. Es un valor de la energía global de energía de vibración.

El índice Law se ha calculado según la Ley del Ruido y, en particular, en el Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones. Según este real decreto, el índice Law se utiliza para “evaluar la molestia y los niveles de vibración máximos,

durante el periodo temporal de evaluación, en el espacio interior de edificios”. El uso de este índice para evaluar las vibraciones viene recogido en el artículo 4.3 de este mismo decreto ley: “en la evaluación de las vibraciones para verificar el cumplimiento de los objetivos de calidad acústica aplicables al espacio interior de las edificaciones, y lo establecido en el artículo 26, se aplicará el índice acústico Law, tal como se define en el anexo I, evaluado de conformidad con lo establecido en el anexo IV”. El artículo 26 explica que se deben de tomar las medidas necesarias para que las vibraciones en el interior de edificios no superen los valores máximos del Índice Law establecidos en el anexo IV.

Por último, decir que en el anexo IV del Real Decreto 1367/2007 establece los valores máximos que puede alcanzar el Índice Law en el interior de edificios en la Tabla C.

Tabla 3-1 Valores límite del Índice Law según el R.D. 1367/2007

Uso del edificio	Valores límite del índice de vibración Law [dB]
Uso sanitario y bienestar social	72
Uso docente. Aulas, salas de lectura y conferencias	72
Uso de viviendas y uso de hospedaje	75

Ahora se va a explicar cómo se ha llevado a cabo el cálculo del Índice Law.

La expresión recogida en la ley es:

$$L_{aw} = 20 \log(a_w/a_0) \text{ [dB]} \quad (3-2)$$

Siendo:

a_w : el máximo del valor eficaz (RMS) de la señal de aceleración $a_w(t)$, con, en el tiempo t ponderación en frecuencia w_m , en m/s^2 .

a_0 : la aceleración de referencia ($a_0= 10^{-6} \text{ ms}^{-2}$).

El valor eficaz $a_w(t)$ se obtiene mediante promediado exponencial con constante de tiempo 1s.

$$a_w(t_0) = \left[\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{t_0} (a_w(t))^2 \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right) dt \right]^{1/2} \quad (3-3)$$

De esta manera se han obtenido resultados del siguiente tipo:

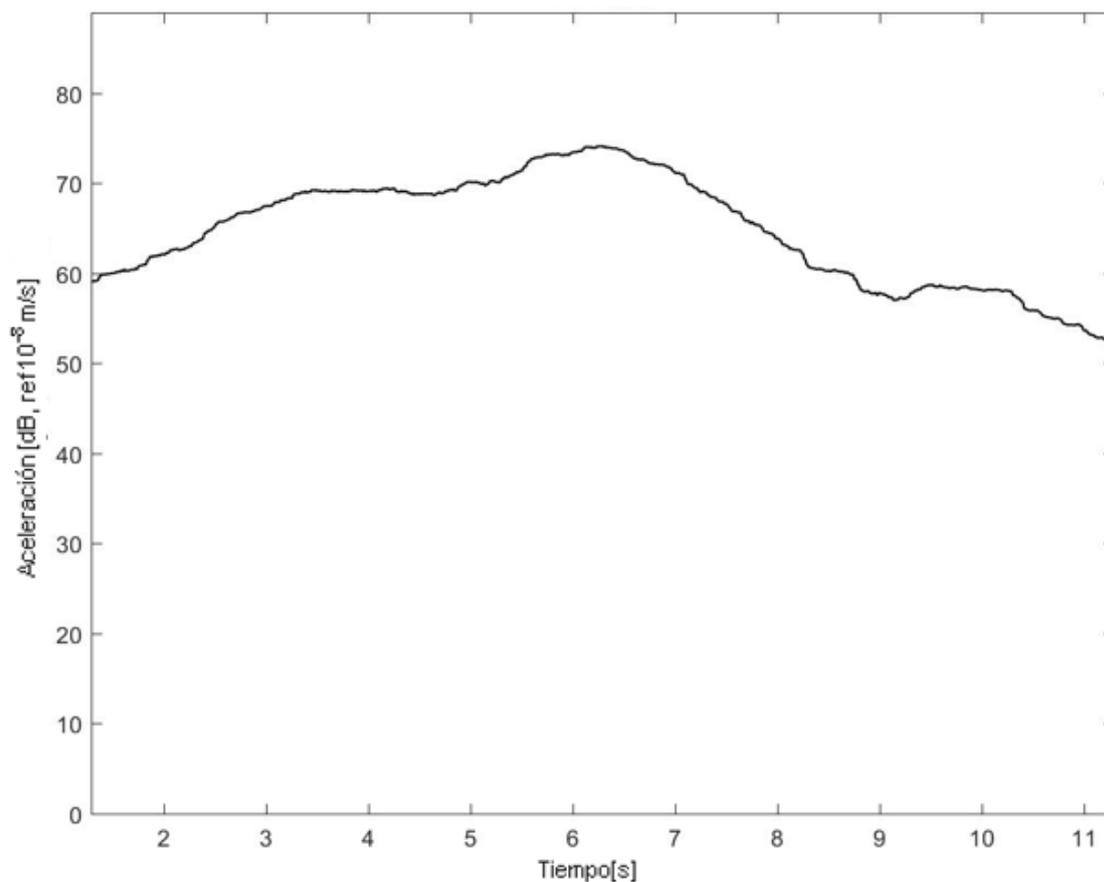


Figura 3-3 Índice Law calculado a partir de las vibraciones producidas por el S103 a una distancia de 5 m en Arroyo de las Piedras

El índice de Law será el máximo valor de la gráfica anterior, obteniéndose en este caso concreto un índice Law de valor 74.1074 dB.

3.4 Índice K

El último parámetro usado en el estudio es el índice K. El índice K es el utilizado normalmente en el análisis de vibraciones de origen ferroviario en España. El índice K es un coeficiente que se calcula para cada valor de aceleración RMS y para cada frecuencia central de tercio de octava. El índice K tomado será el máximo de todos.

Dicho índice se define a partir del espectro de tercios de octava de la señal de aceleración RMS y se ha calculado según el Anexo A de la norma ISO 2631-2(edición de 1989). Esta versión fue sustituida por la edición de 2003, de la que este cálculo fue retirado.

Cuando se necesita información más detallada acerca de un sonido complejo, el rango de frecuencias se puede dividir en secciones o bandas. Estas bandas normalmente tienen una anchura de una octava o un tercio de octava. Una banda de octava es una banda de frecuencia donde la frecuencia más alta es dos veces la frecuencia más baja. Por ejemplo, un filtro de octava con una frecuencia central de 1 kHz tiene una frecuencia inferior de 707Hz y una superior de 1414kHz. Cualquier frecuencia que esté por debajo y por encima de estos límites lo rechaza. Un tercio de octava tiene una anchura de 1/3 de la de una banda de octava.

Las bandas de tercios de octava que se han tomado en el caso que se muestra como ejemplo son:

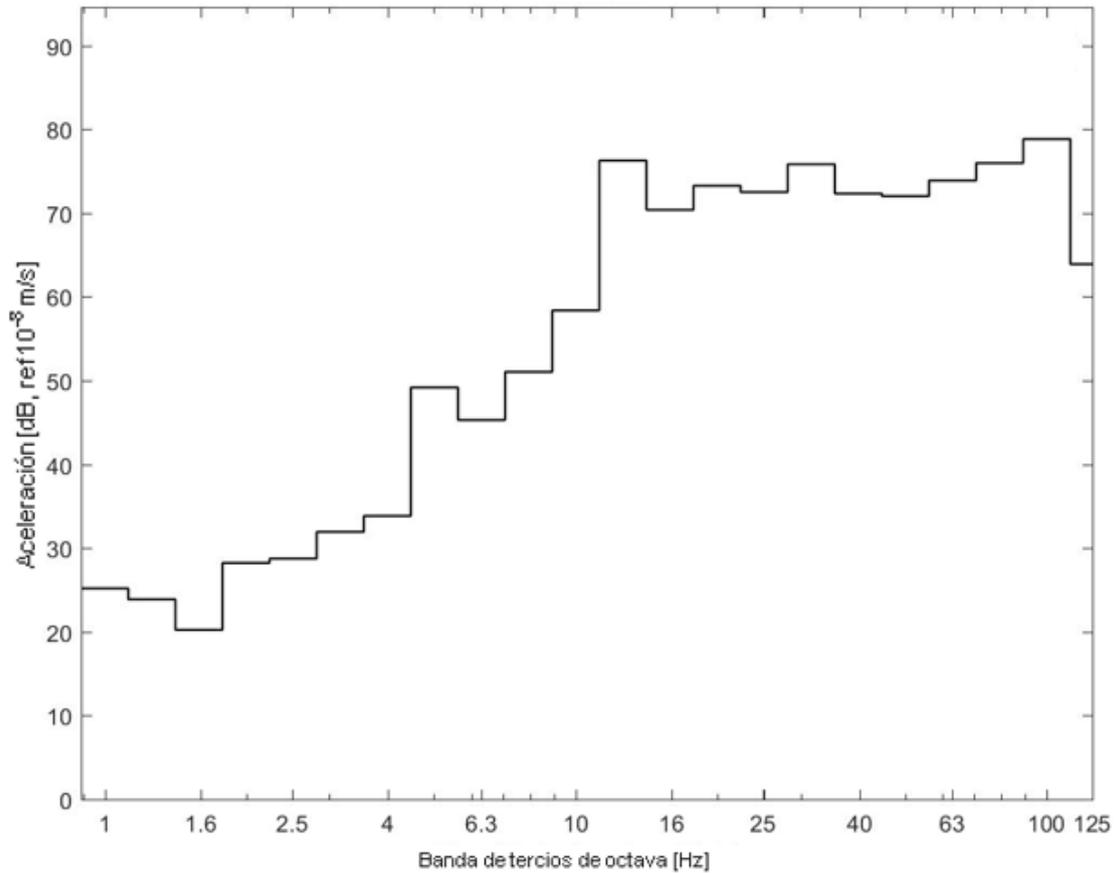


Figura 3-4 Bandas de tercio de octava de las vibraciones producidas por el S103 a una distancia de 5 m en Arroyo de las Piedras

A partir de los tercios de octava se calculan distintos Índice K de la siguiente forma:

Tabla 3-2 Cálculo del Índice K en función de la frecuencia de la banda de tercio de octava

Índice K	$K_i = a_i / 0.0035$	$1 \leq f \leq 2$ Hz
	$K_i = a_i / [0.0035 + 0.000257(f - 2)]$	$2 \leq f \leq 8$ Hz
	$K_i = a_i / (0.00063f)$	$8 \leq f \leq 80$ Hz

De todos los valores obtenidos (uno por cada tercio de octava), el Índice K que se ha tomado es el máximo de todos. En el caso que se ha tomado como ejemplo, el valor del Índice K (el máximo) que se ha usado para el estudio es de 0.811 dB.

Uno de los problemas que se puede presentar al usar el índice K es que, al tomar el valor máximo, el índice K de una vibración en el que se alcanza un valor máximo para varias frecuencias es igual al de una vibración en el que se alcanza ese mismo valor máximo para una sola frecuencia.

Por último, el Anexo A de la norma ISO 2631-2(edición de 1989), establece los límites en la tabla 2 los límites del Índice K dependiendo de la zona estudiada:

Tabla 3-3 Valores límite del Índice K según el Anexo A de la norma ISO 2631-2

Uso del edificio	Periodo	Valores límite del índice K
Sanitario, hospitales, quirófanos y áreas críticas	Día/Noche	1
Residencial, viviendas	Día	2
	Noche	1,4
Oficinas	Día/Noche	4
Comercial y almacenes	Día/Noche	8

4 RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Introducción

En este capítulo se van a presentar las gráficas comparativas de las vibraciones producidas por el paso de un tren con respecto a cuatro variables distintas: la distancia a la que estaba situada el acelerómetro, la velocidad de paso del tren, la velocidad de propagación las ondas de S (coeficiente C_s) y el tipo de tren. Antes de comenzar caben destacar tres aspectos.

A la hora de representar las vibraciones en función de la distancia a la que se situaba el acelerómetro, sólo se han tenido en cuenta los acelerómetros situados en el suelo, ya que es en lo que se basa el estudio, y se han descartado los resultados obtenidos de acelerómetros situados en traviesas, vía, etc.

Por otro lado, en la comparativa de las vibraciones con respecto al coeficiente c_s , se ha identificado el suelo mediante el coeficiente c_s medio de los 30 primeros metros de profundidad del suelo.

El cálculo del coeficiente c_s medio se ha realizado de manera similar al de un centro de masas. Para calcular el coeficiente c_s medio se ha tomado el coeficiente c_s de cada estrato junto con su espesor y se han multiplicado, después se han sumado todos los resultados y se ha dividido de 30. Hay que tener en cuenta que, al sólo tener en cuenta los 30 primeros metros de profundidad, el espesor del último estrato se considera hasta los 30 m de profundidad y no infinito. Se va a realizar el cálculo del coeficiente c_s de Bruselas para ejemplificar el cálculo de todos los demás.

En la tabla 4-1 se muestran las características del terreno del ensayo de Bruselas.

Tabla 4-1 Perfil del terreno del ensayo de Bruselas

Estrato	Espesor [m]	C_s [m/s]	Coefficiente de amortiguamiento
1	1.4	80	0.03
2	1.9	133	0.03
3	Inf	226	0.03

El cálculo que se debe realizar para obtener el coeficiente c_s medio del ensayo de Bruselas sería:

$$c_{s\text{medio}} = \frac{1.4 \cdot 80 + 1.9 \cdot 133 + (30 - 1.4 - 1.9) \cdot 226}{30}$$

El resultado obtenido es 213.29 m/s.

En la siguiente tabla se presentan los coeficientes c_s medios de cada ensayo.

Tabla 4-2 Coeficientes c_s medios de cada ensayo

Ubicación	Zona	Cs medio [m/s]
Bruselas	Bruselas	213,29
Arroyo de las Piedras	Arroyo de las Piedras	-
Córdoba	Córdoba	596,7
Écija	Écija	-
Palencia	10A	525,53
	10B	448,3
	10C	413,33
	11A	487,96
	11B	575,67
	11C	-
Reugny	Reugny	390,2
Saint-Épain	Saint-Épain	475,33
Zamora	1	285,3
	2	470,4
	6	417,9
Orense	4	368,3
	6	-
	7	1030,1

Como se puede observar, de algunos ensayos no se conocen los datos del terreno.

En cada caso se han calculado la media, la desviación típica, la varianza y el coeficiente de correlación. A la hora de elaborar las gráficas se han representado las aceleraciones o los índices junto con la media y el intervalo de confianza, delimitado por dos líneas, una por encima de la media y otra por debajo de la media.

El intervalo de confianza que se ha establecido ha sido el siguiente:

$$(\bar{x} - 2 \cdot \sigma, \bar{x} + 2 \cdot \sigma) \quad (4-1)$$

Siendo \bar{x} la media y siendo σ la desviación típica.

La media se ha calculado con el comando de Matlab “mean”, la varianza con el comando “var” y la desviación típica con el comando “std”.

El coeficiente de correlación es una medida de relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. Indica la proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se ha calculado con la orden de Matlab “corrcoef”.

Por último, cabe destacar de que se han realizado gráficas comparativas de las vibraciones con respecto a una variable y luego se han realizado gráficas comparativas de dos variables a la vez.

4.2 Distancia del acelerómetro

La primera de las variables que se va a estudiar es la distancia de vía a la que se ha medido la vibración. Se ha representado la nube de puntos correspondiente a los resultados del ensayo y se ha aplicado una recta de regresión a esta nube de puntos.

Los resultados obtenidos en función de los tres indicadores de vibración son los siguientes:

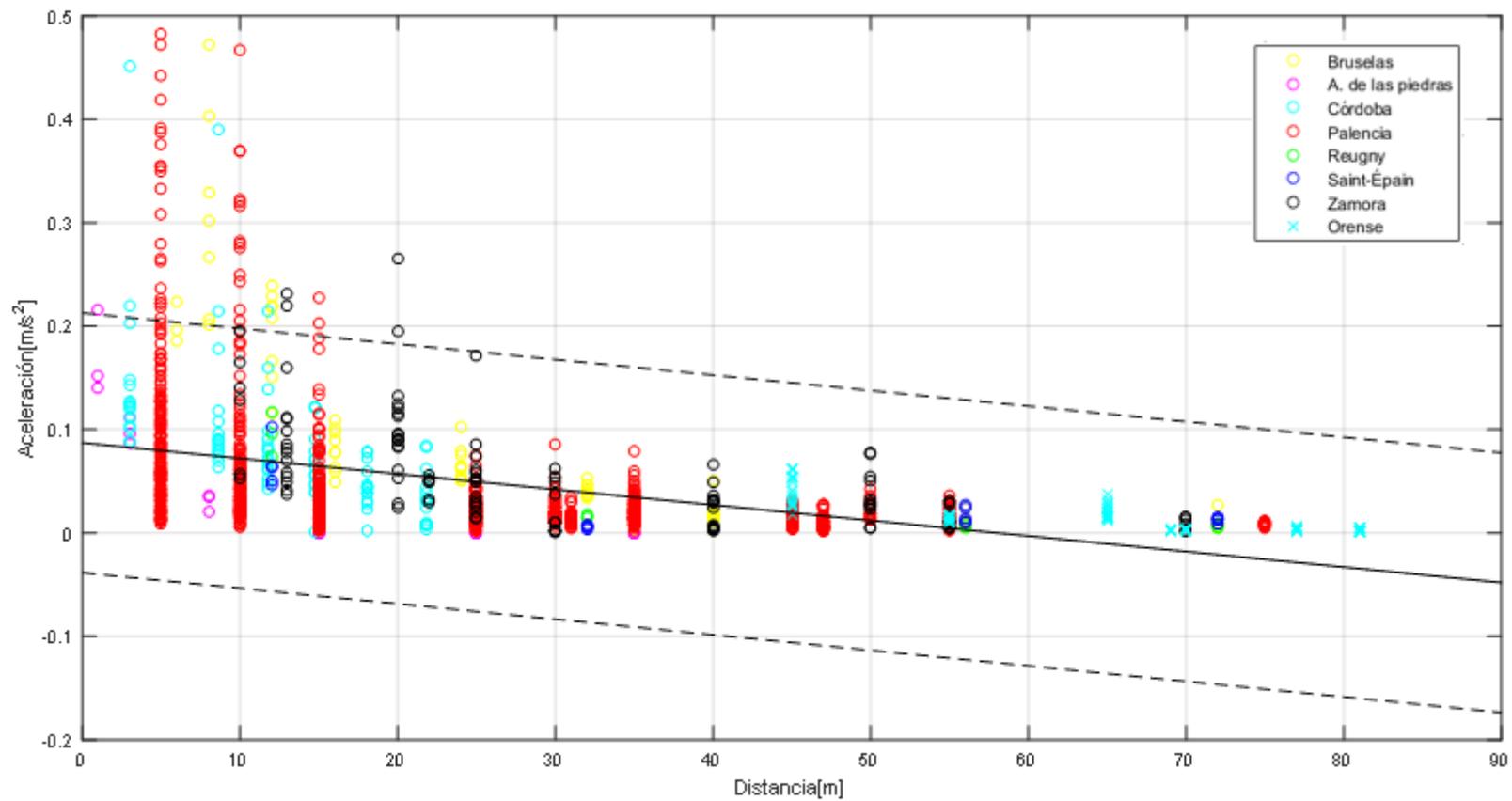


Figura 4-1 Aceleración máxima frente a la distancia del acelerómetro

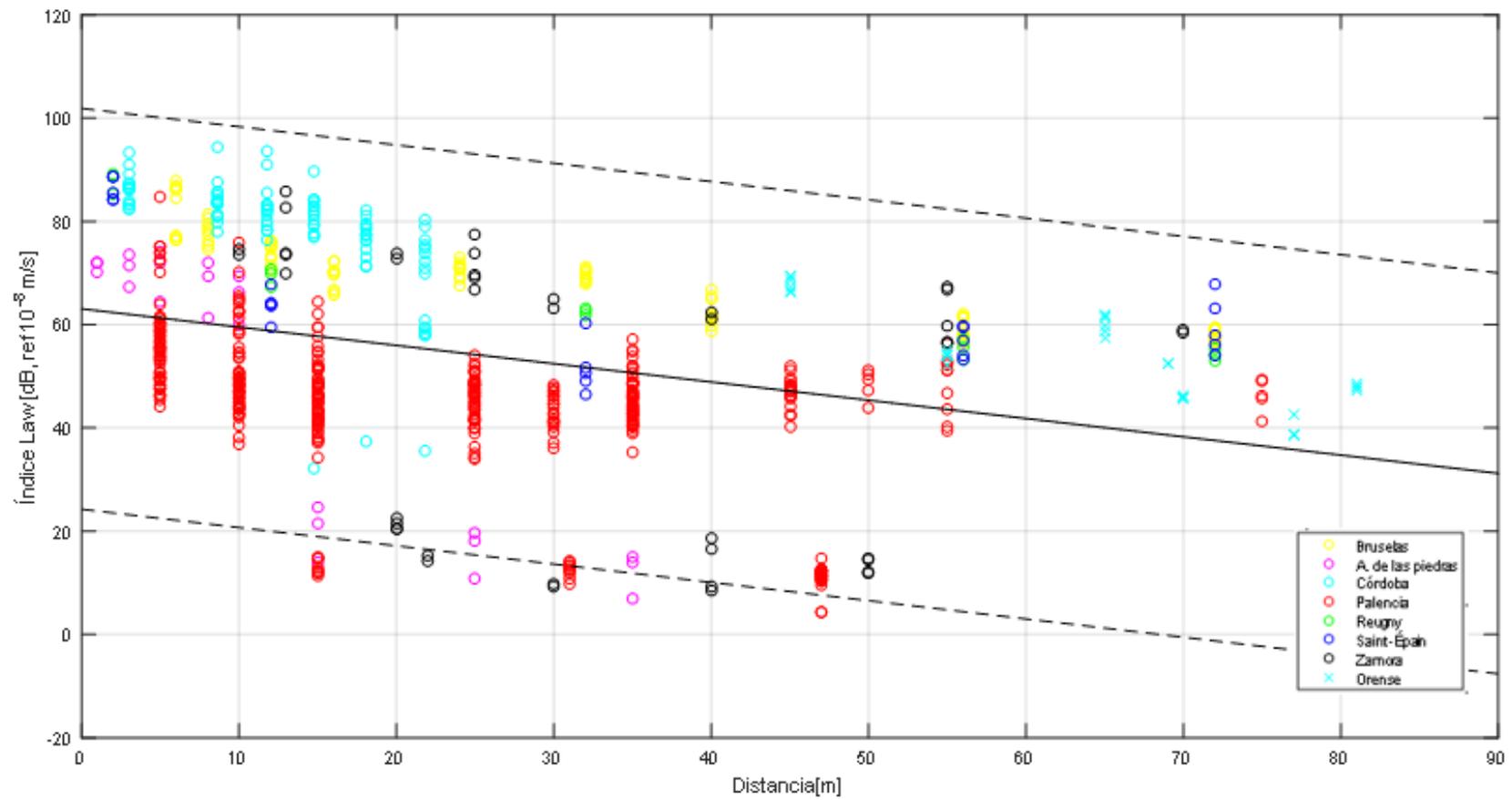


Figura 4-2 Índice Law frente a la distancia del acelerómetro

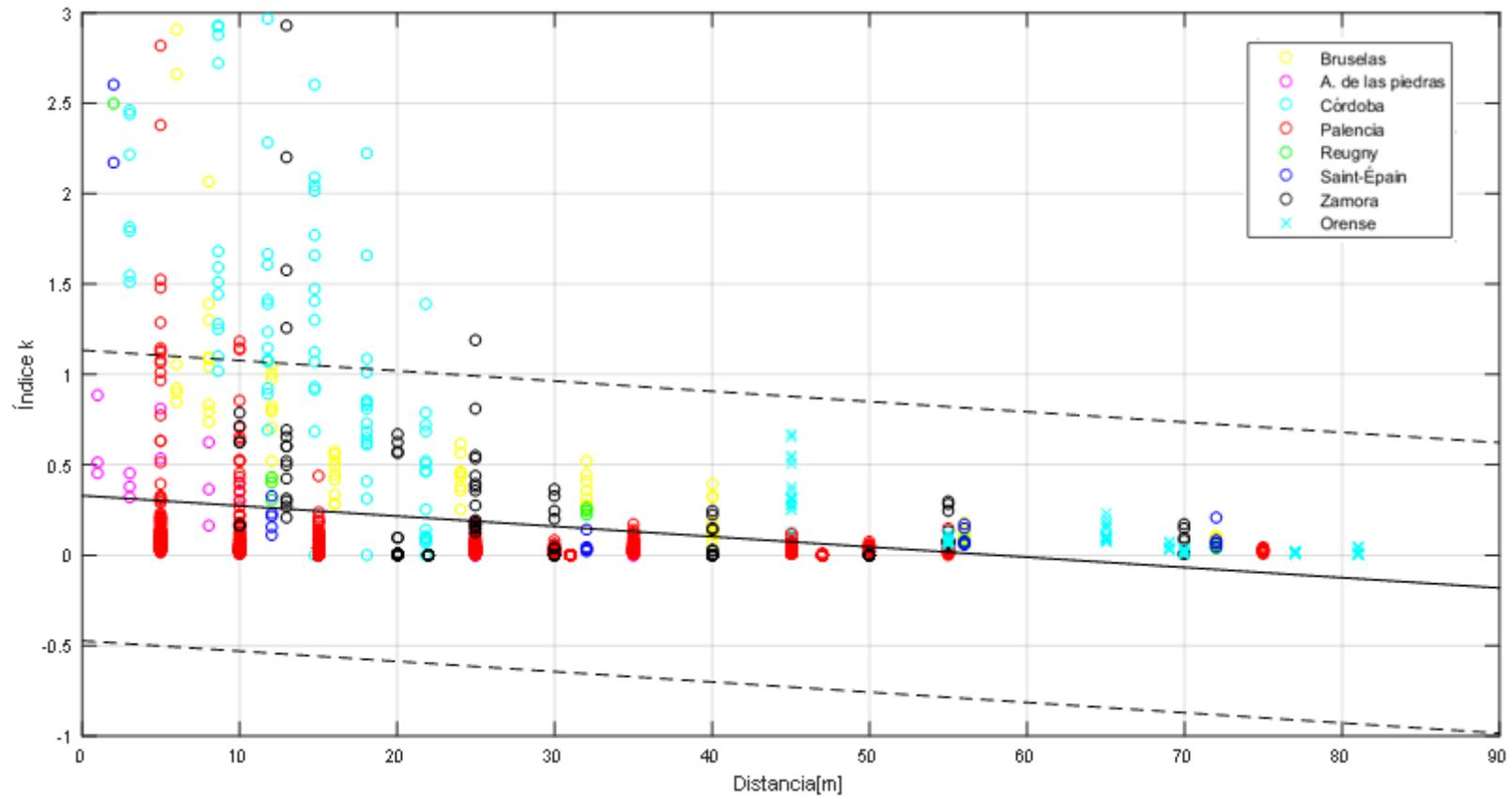


Figura 4-3 Índice K frente a la distancia del acelerómetro

En las tres gráficas se puede observar cómo, al aumentar la distancia a la que se han medido las aceleraciones producidas por el paso del tren, disminuyen dichas vibraciones, ya sean las propias aceleraciones o los índices calculados a partir de estas.

El resultado obtenido era el esperado a priori, ya que la vibración se va a ir atenuando conforme nos alejamos del foco, debido a la disipación de energía del suelo y otros elementos que se puedan encontrar entre el foco (en el caso que abarca este estudio la vía) y el acelerómetro.

Este resultado coincide con los resultados obtenidos en uno de los artículos de referencia de este proyecto, “Large scale international testing of railway ground vibrations across Europe”, en el que se estudió la vibración producida por el paso de trenes en función de la distancia, y el resultado es similar

Se ha calculado la media, la varianza y el coeficiente de correlación de los tres pares de datos anteriores (distancia junto con aceleración máxima, Índice Law e Índice K).

Tabla 4-3 Coeficientes de correlación, media, varianza, desviación típica y porcentaje dentro del intervalo de confianza de los distintos indicadores de vibración frente a la distancia

Indicador de vibración	Aceleración máxima [m/s ²]	Índice Law [dB]	Índice K
Media	0,0463	53,9640	0,1760
Varianza	0,0039	376,5032	0,1615
Desviación típica	0,0039	19,4037	0,4018
Porcentaje en el i. de confianza	96,2252	96,3873	95,5499
Coefficiente de correlación	-0,4498	-0,3492	-0,2661

Se puede observar como todos los coeficientes de correlación de este caso son negativos, ya que conforme aumenta una de las variables (la distancia), disminuye la otra variable (la vibración).

También decir que, el valor de correlación es bastante alto, sobre todo en el caso de la aceleración máxima, por lo que se puede decir que estos parámetros están muy ligados.

4.3 Velocidad de paso del tren

La siguiente variable que se va a estudiar es la velocidad de paso del tren que produce la vibración. Se ha representado la nube de puntos correspondiente a los resultados del ensayo y se ha aplicado una recta de regresión a esta nube de puntos.

Los resultados obtenidos en función de los tres indicadores de vibración son los siguientes:

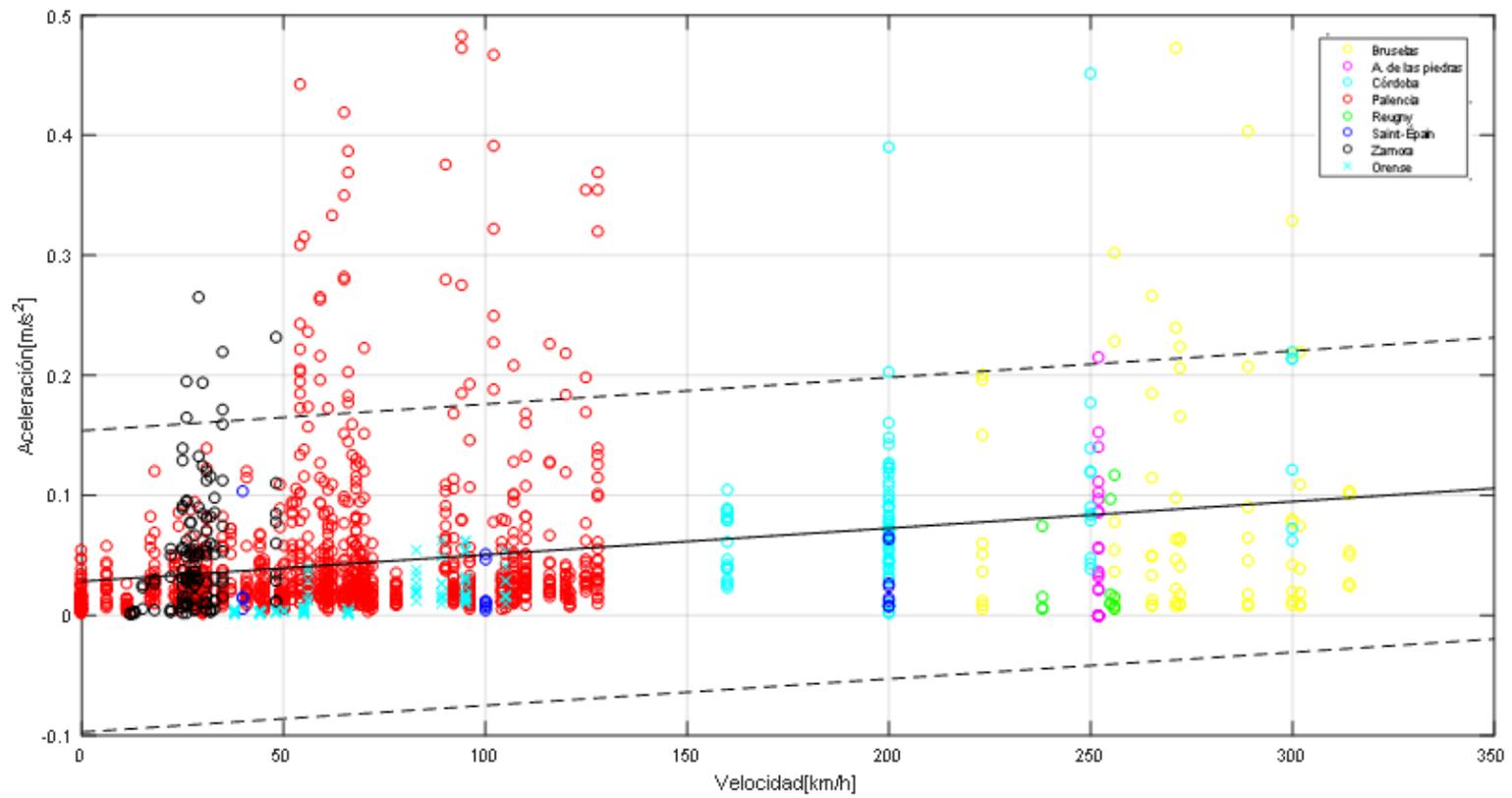


Figura 4-4 Aceleración máxima frente a velocidad de paso del tren

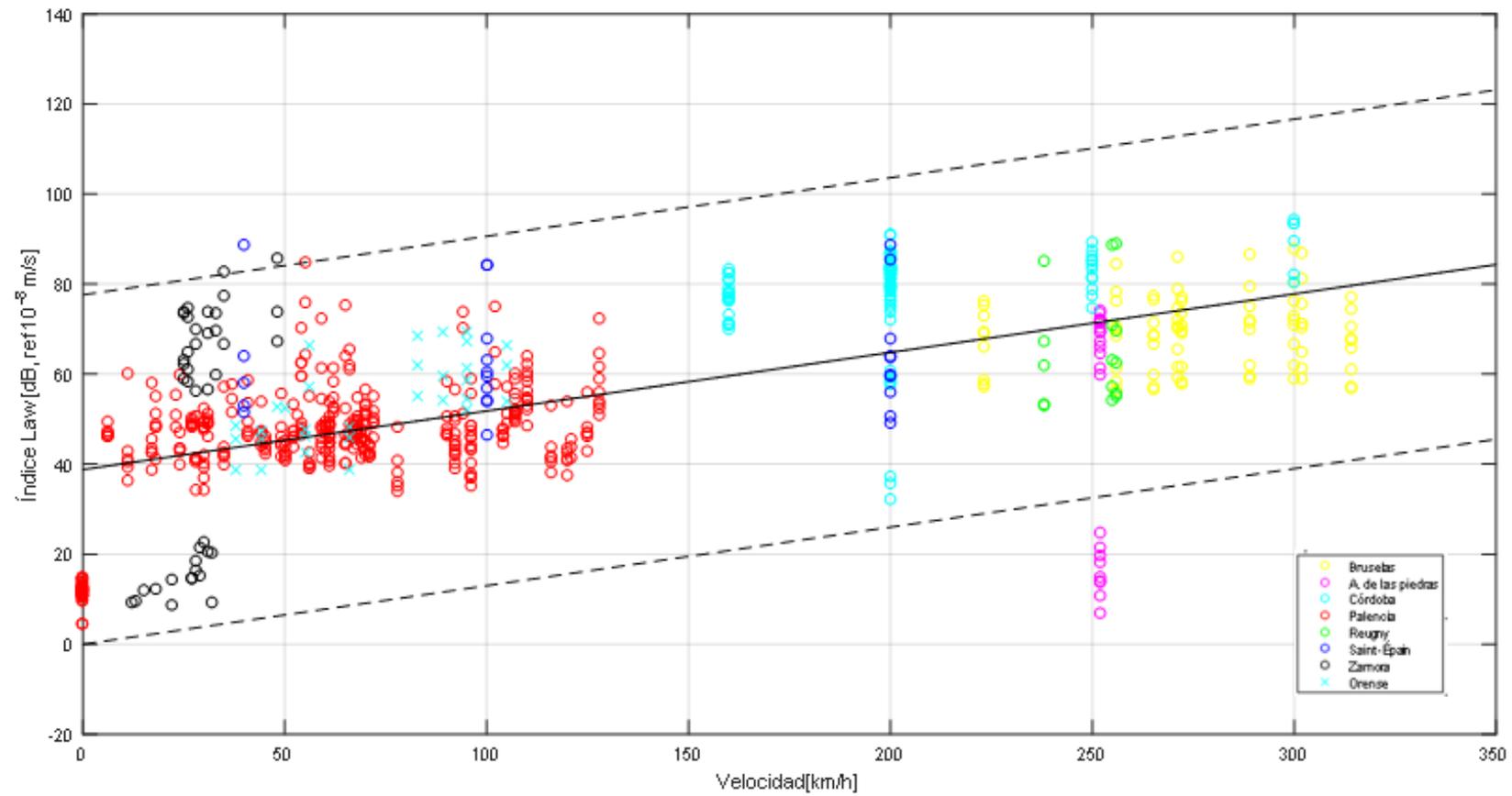


Figura 4-5 Índice Law frente a velocidad de paso del tren

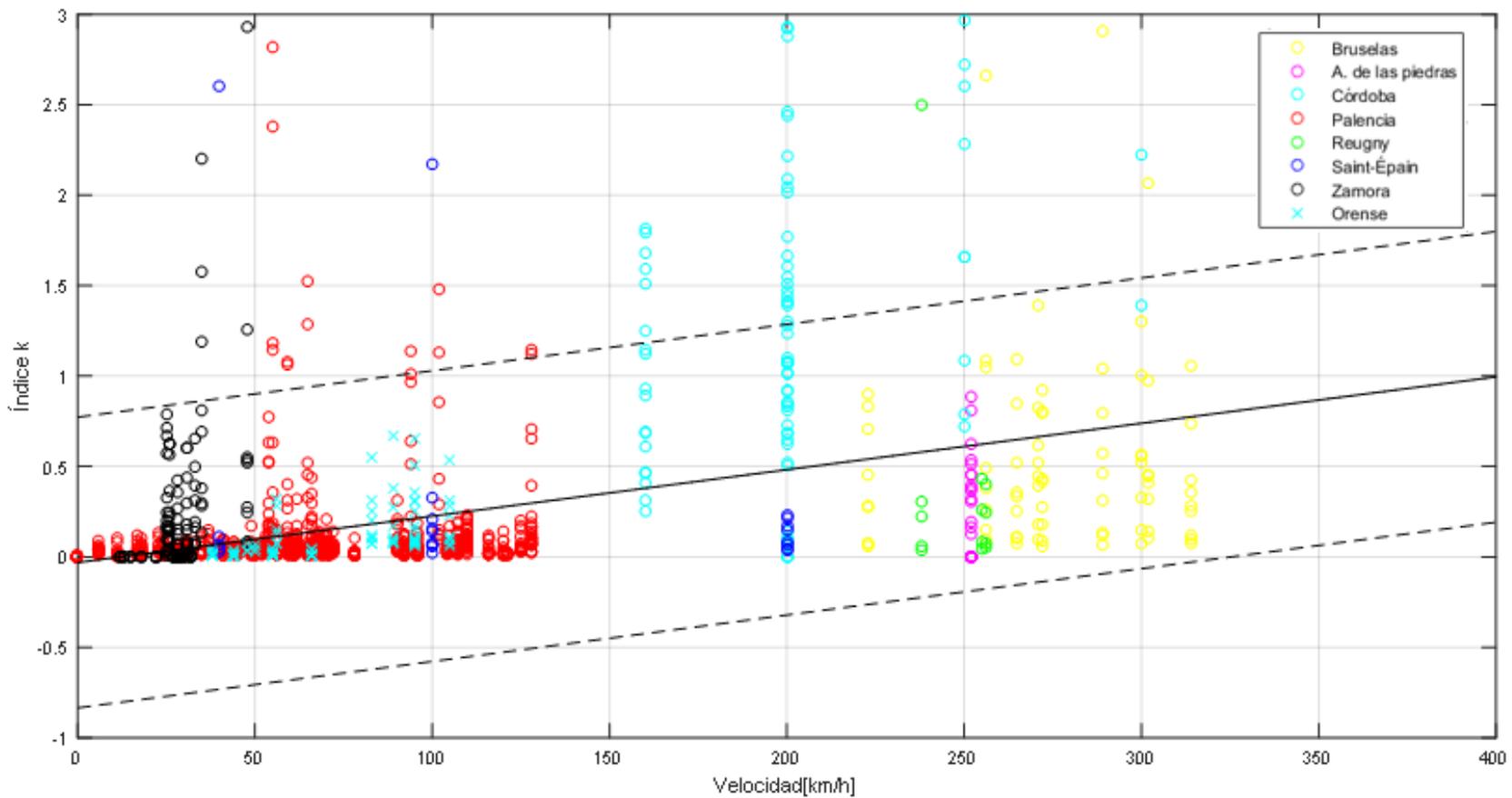


Figura 4-6 Índice K frente a velocidad de paso del tren

En las tres gráficas se puede observar cómo, al aumentar la velocidad de paso del tren, aumenta la vibración, sin embargo, cabe destacar que aparecen valores altos de vibración para velocidades bajas.

En el artículo mencionado anteriormente, “Large scale international testing of railway ground vibrations across Europe”, existe también una comparación entre la velocidad de paso del tren y la vibración producida por este paso. Al compararlo con el artículo, en este estudio se puede observar una mayor relación entre las vibraciones y la velocidad de paso. Esto ocurre debido a las características del terreno, como se explicará más adelante en el estudio.

Si se compara con los resultados del trabajo “Free field vibration measurements during the passage of a Thalys High speed train” de Geert Degrande (el cual se ha utilizado también como base de este estudio) se puede observar como la variación es similar a la de nuestro estudio (aumento de la vibración proporcional a la velocidad).

También, citar que en la Tesis doctoral de Pedro Galvín Barrera, “Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía”, se demostró como las vibraciones aumentan al acercarse la velocidad de paso a la velocidad crítica del tren (la cual se encuentra entre la velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh y la velocidad de propagación de las ondas S en el suelo). Al no conocer la velocidad de propagación de las ondas Rayleigh de los terrenos de los ensayos del trabajo y por tanto no poder estimar la velocidad crítica de la vía, es complicado observar esto, y más cuando existen casos con velocidad superior a la velocidad de propagación de las ondas S y casos con velocidad inferior.

Por último, se ha calculado la media, la varianza y el coeficiente de variación:

Tabla 4-4 Coeficientes de correlación, media, varianza, desviación típica y porcentaje dentro del intervalo de confianza de los distintos indicadores de vibración frente a la velocidad de paso

Indicador de vibración	Aceleración máxima [m/s ²]	Índice Law [dB]	Índice K
Media	0,0463	53,9640	0,1760
Varianza	0,0039	376,5032	0,1615
Desviación típica	0,0628	19,4037	0,4018
Porcentaje en el i, de confianza	95,5854	98,1214	96,3764
Coficiente de correlación	0,2517	0,6226	0,4250

En este caso el coeficiente de correlación es positivo (existe una proporcionalidad directa entre la velocidad de paso del tren y la vibración que produce). El valor del coeficiente de correlación es bastante alto, siendo su máximo valor el del caso del Índice Law.

4.4 Velocidad de propagación de las ondas S

La siguiente variable que se va a estudiar es la velocidad de propagación de las ondas S del suelo (coeficiente c_s). Como se ha explicado antes, se ha calculado un coeficiente c_s medio del terreno, en el que se han tenido en cuenta sólo los 30 primeros metros.

Se ha representado la nube de puntos correspondiente a los resultados del ensayo y se ha aplicado una recta de regresión a esta nube de puntos. Cabe destacar que, al no tener datos del suelo de todos los ensayos, esta gráfica tiene menos valores que las otras realizadas.

Los resultados obtenidos en función de los tres indicadores de vibración son los siguientes:

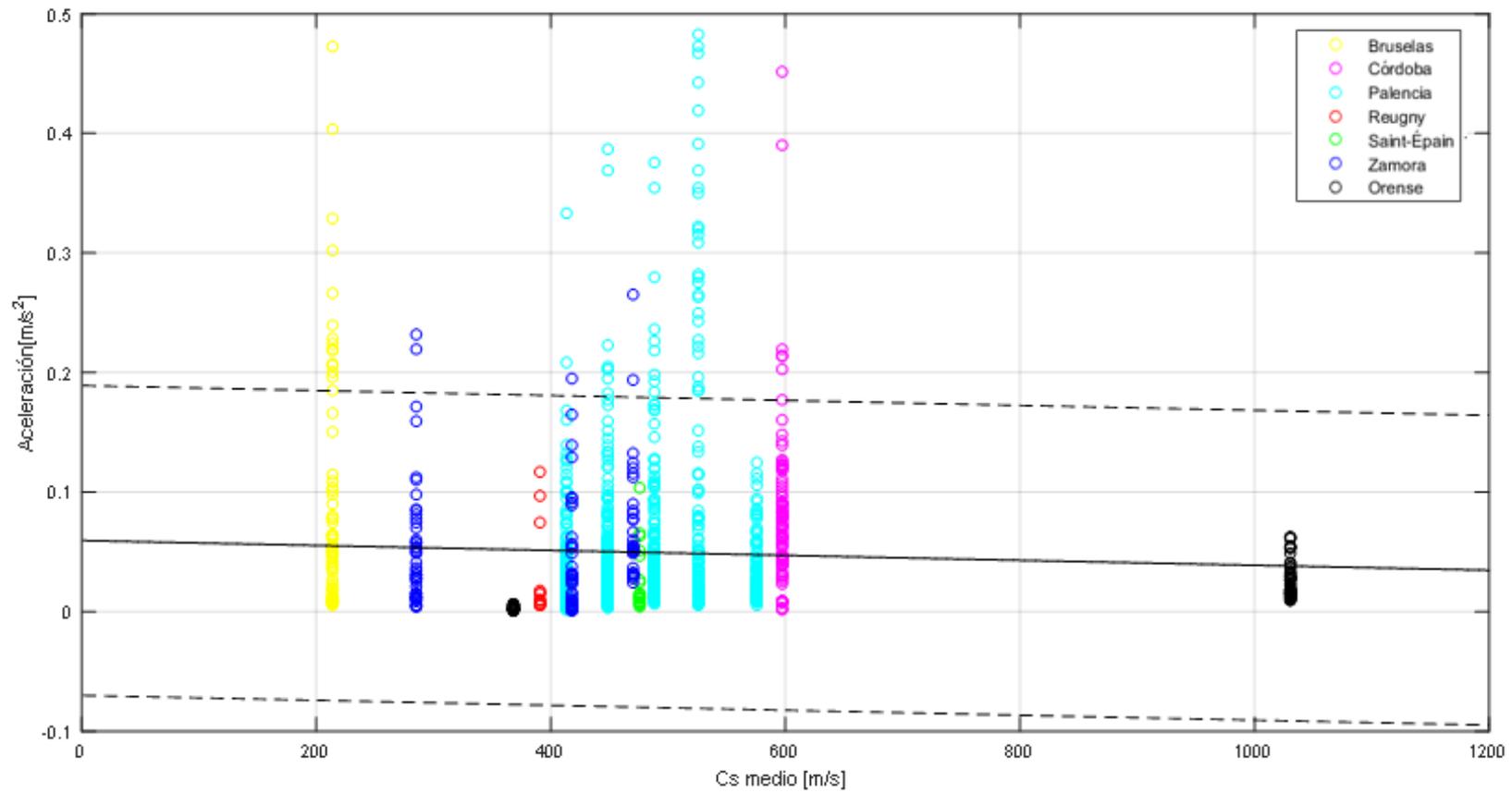


Figura 4-7 Aceleración máxima frente al coeficiente cs del suelo

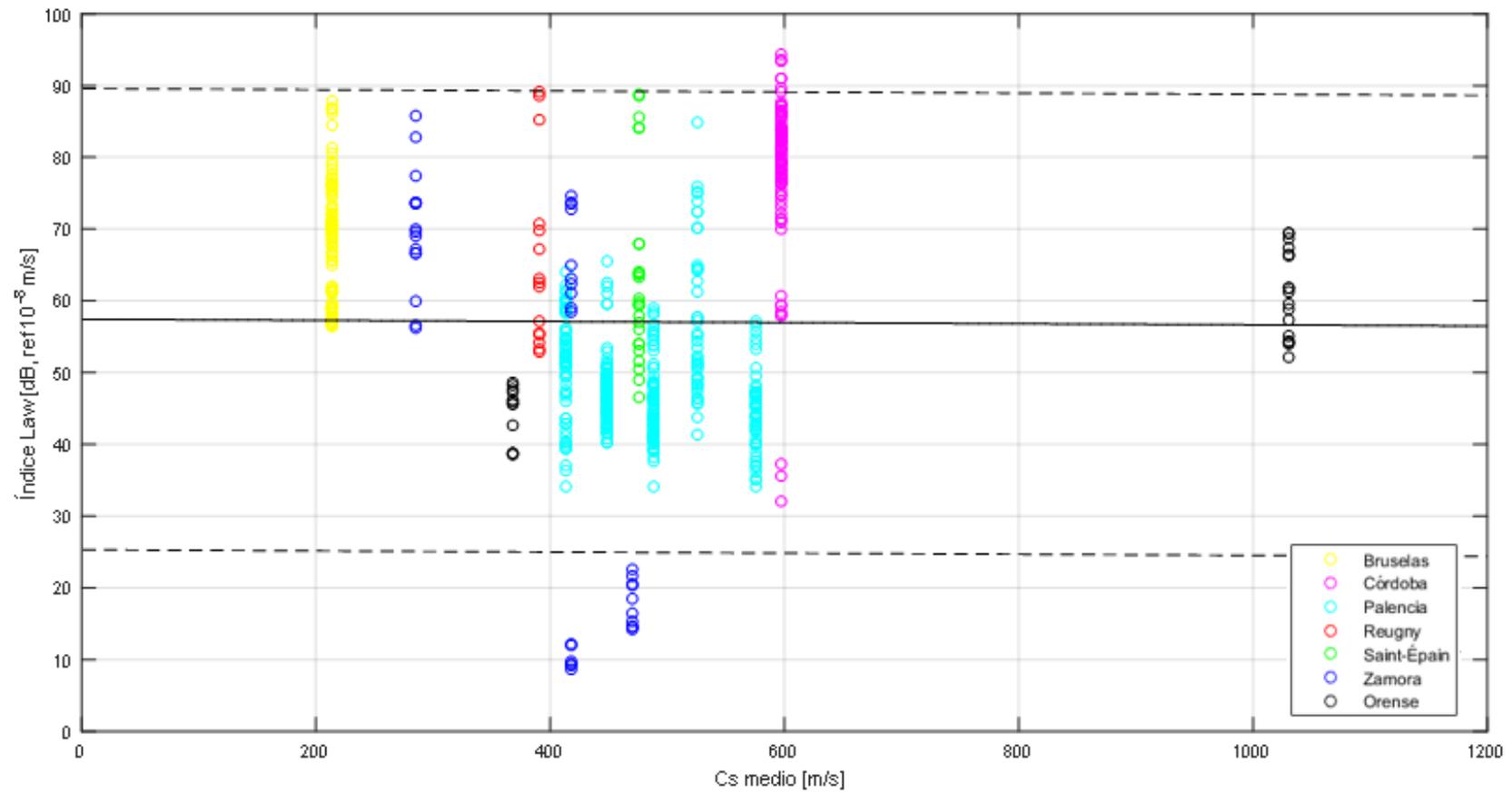


Figura 4-8 Índice Law frente al coeficiente cs del suelo

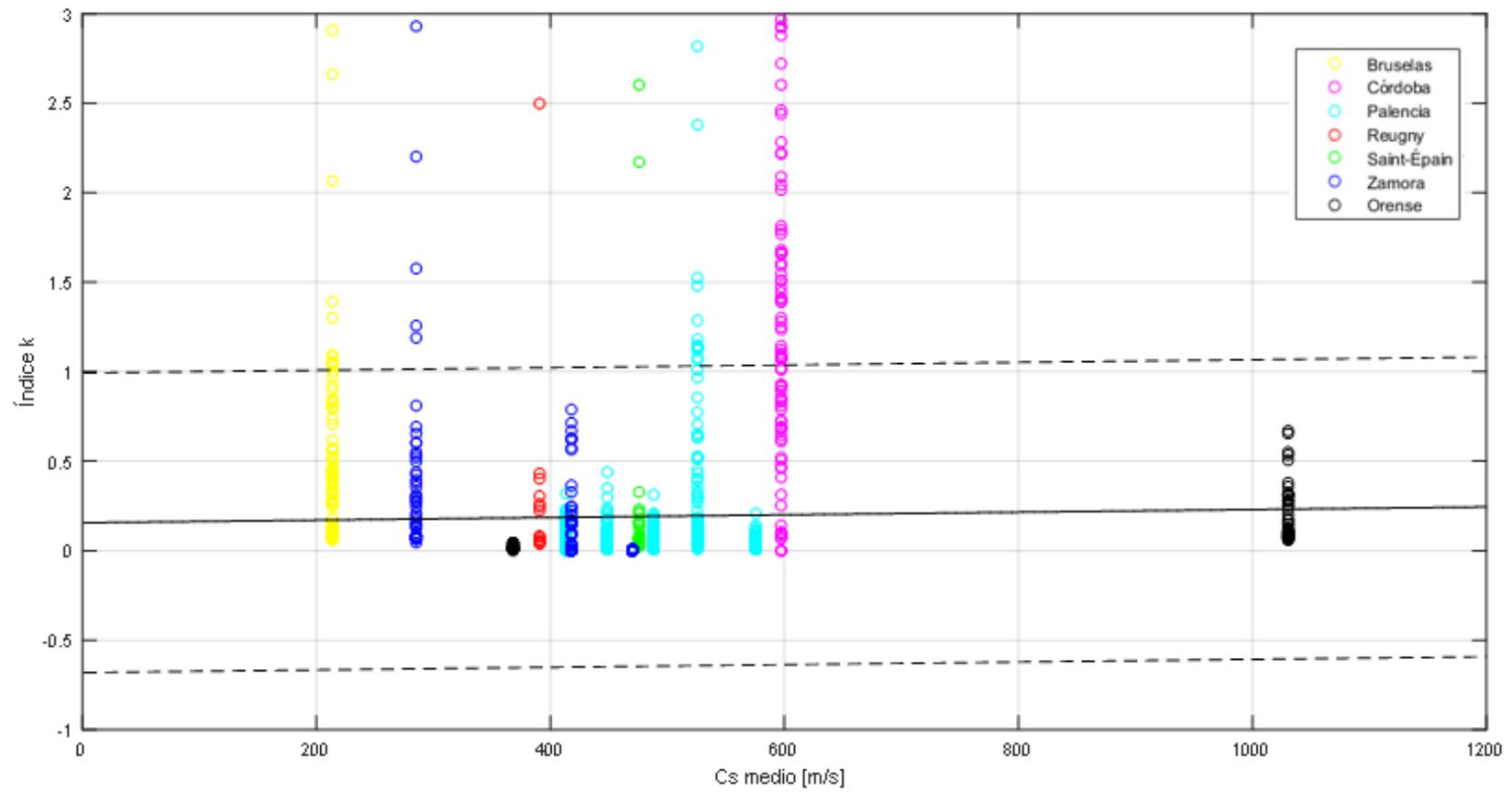


Figura 4-9 Índice K frente al coeficiente C_s del suelo

En las tres gráficas se puede observar cómo, la velocidad de propagación de ondas S no tiene una relación directa con las vibraciones que se producen (en el caso del Índice Law la recta de regresión es prácticamente paralela al eje). Como se ha puntualizado antes, el coeficiente c_s va a tener influencia conjunta con la velocidad, por lo que estudiarla por separado no aporta mucha información.

Se ha calculado la media, la varianza y el coeficiente de variación:

Tabla 4-5 Coeficientes de correlación, media, varianza, desviación típica y porcentaje dentro del intervalo de confianza de los distintos indicadores de vibración frente al coeficiente c_s

Indicador de vibración	Aceleración máxima [m/s ²]	Índice Law [dB]	Índice K
Media	0,0496	57,0664	0,1908
Varianza	0,0042	258,1317	0,1752
Desviación típica	0,0648	16,0665	0,4186
Porcentaje en el i, de confianza	92,8063	96,3082	92,5743
Coefficiente de correlación	-0,0444	-0,0073	0,0245

Se puede observar cómo la influencia del coeficiente c_s , a priori, es mínimo, ya que los valores del coeficiente de correlación son muy pequeños y hasta el signo es distinto entre los distintos indicadores.

Se tendrá que estudiar si la influencia es mínima de por sí, si es importante pero menos que otros factores (como la velocidad y la distancia) o si influye en otros parámetros y no directamente en las vibraciones.

Por último, destacar que los valores de media y varianza en este caso son distintos a los de la comparativa con velocidad y distancia, ya que, como se ha explicado antes, en este caso existen menos datos en la nube de puntos, debido a que no en todos los ensayos se midieron las características del suelo.

4.5 Tipo de tren

La última variable que se va estudiar por separado es el tipo de tren. Se ha decidido observarlo sólo respecto al Índice Law, ya que, como se podrá observar, esta variable tiene muy poca influencia sobre las vibraciones dado que la varianza de los resultados para un mismo tren es muy grande.

Se ha representado la nube de puntos correspondiente a los resultados del ensayo y la media de cada tren.

Los resultados obtenidos al comparar el tipo de tren respecto al Índice Law son los siguientes:

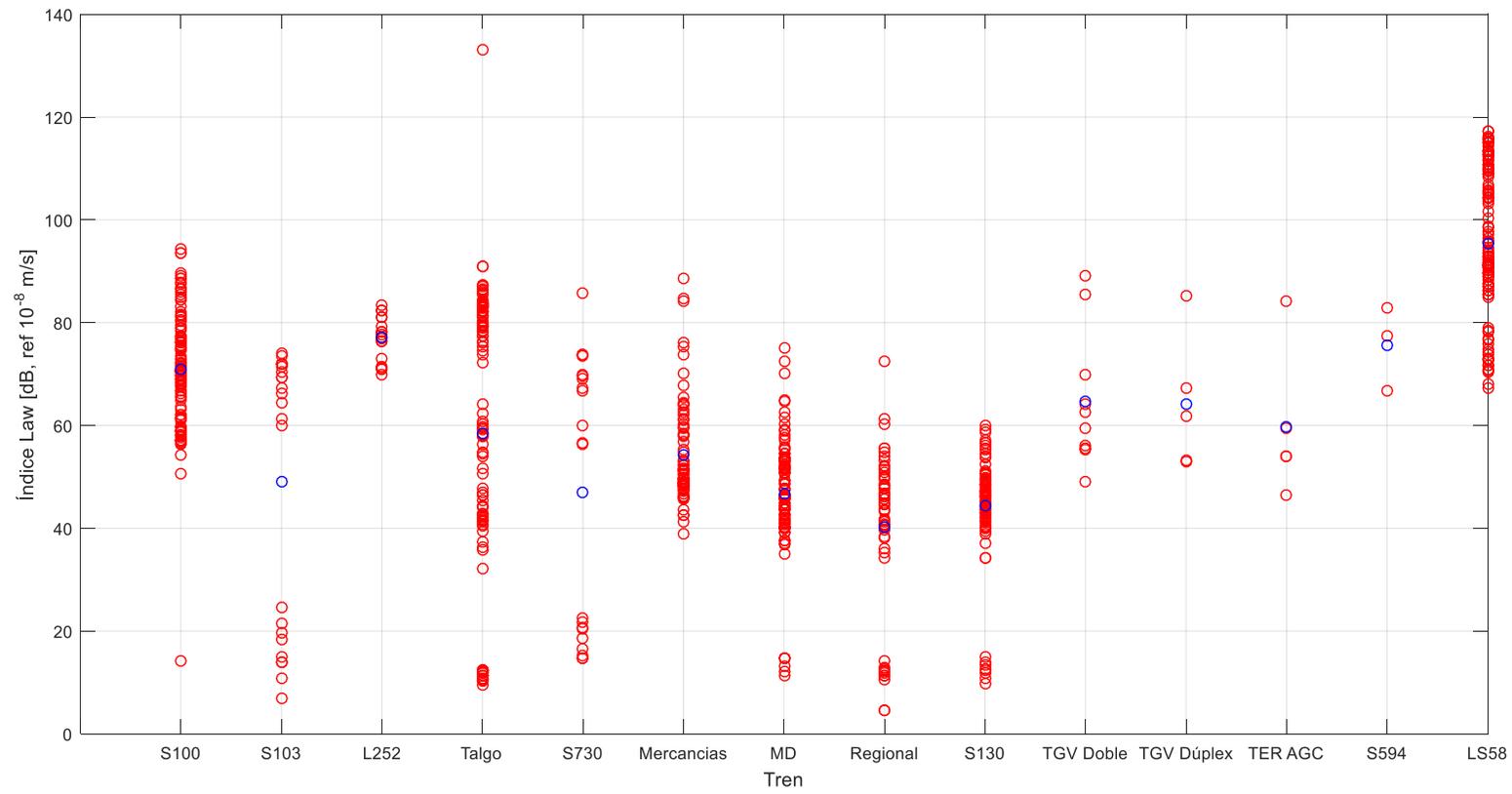


Figura 4-10 Índice Law frente al tipo de tren (en azul la media)

Antes de realizar una reflexión, se considera conveniente calcular la media y la varianza de los datos obtenidos de cada tren.

Tabla 4-6 Medias y varianzas de los índices Law de cada tipo de tren

Tipo de tren	Media [dB]	Varianza [(dB) ²]
S100	71,03	412,55
S103	49,16	537,91
L252	77,03	781,75
Talgo	58,37	863,18
S730	49,46	860,28
Mercancias	54,53	734,35
MD	46,58	526,85
Regional	40,26	531,65
S130	44,26	96,84
TGV Doble	64,63	342,91
TGV Duplex	64,12	175,77
TER AGC	59,61	153,85
S594	75,63	145,32
LS58	95,36	834,06

Para empezar, al ver la gráfica, se puede observar cómo existen varios tipos de trenes (como el Talgo o el S730) en los que hay varios grupos de resultados con Índices Law bastante diferentes, lo que se puede considerar que es consecuencia de que o bien se tratan de resultados de distintos ensayos en los que las distancias o velocidades eran muy distintas entre ellos, o bien corresponden a un mismo ensayo pero las distancias o velocidades eran muy diferentes en ese ensayo (situación que a priori no existe en el estudio). Estos resultados son los que tienen grandes varianzas, como se contempla en la Tabla 4-2.

Por otro lado, se pueden observar tipos de trenes que se encuentran en un solo ensayo, como el TER AGC, y siguen teniendo una varianza considerable.

Por último, cabe destacar que, salvo algunas excepciones, en muchos de los ensayos suele aparecer siempre el mismo tipo de tren, y, viendo las varianzas tan altas que se alcanzan, se puede concluir que el tipo de tren tiene una influencia muy pequeña, en comparación con las otras variables, en el nivel de vibración producido. Se podría concluir diciendo que, si se quisiera estudiar la influencia del tipo de tren con exactitud, se tendría que realizar un ensayo con los distintos tipos de tren medidos a una misma distancia, en un mismo lugar y todos pasando a una misma velocidad.

4.6 Velocidad de paso del tren y distancia del acelerómetro

Las primeras dos variables que se van a estudiar a la vez son la velocidad de paso del tren y la distancia del acelerómetro. Para estudiar estas dos variables a la vez, se ha realizado dejando fija otra variable, como es el coeficiente c_s del suelo. Se han tomado cinco casos distintos, todos con el mismo c_s , y se ha estudiado cómo varían las vibraciones en función de, por un lado la distancia al acelerómetro y por otro lado la velocidad de paso del tren.

Para este caso se ha elegido como indicador del nivel de vibración el Índice Law.

El primero de los casos elegidos es el de Arroyo de las Piedras, en el que se le midieron las vibraciones a tres trenes que tenían la misma velocidad. En este caso sólo se puede estudiar la variación respecto a la distancia, pero parece de interés este caso.

Tabla 4-7 Media, varianza y coeficiente de correlación de los Índices de Law del ensayo de Arroyo de las Piedras

D[m]/v[km/h]	252	252	252
1	7,20E+01	70,2835178	71,91477284
3	73,6374855	67,27966681	71,55806433
5	74,1074131	64,49036452	71,91418482
8	71,8662547	61,33674692	69,38733688
10	69,4618321	59,91104608	66,16888271
15	24,7016891	14,01830108	21,54503615
25	19,7528511	10,74852095	18,23906604
35	14,9265517	6,876247738	13,87385907
Media	52,5614586	44,36805149	50,57515036
Varianza	745,000329	798,2854042	740,4905815
Desviación típica	27,2946942	28,25394493	27,21195659
Porcentaje en el i. de confianza	100	100	100
Coef. Correlación	-0,9060352	-0,909595339	-0,904126131

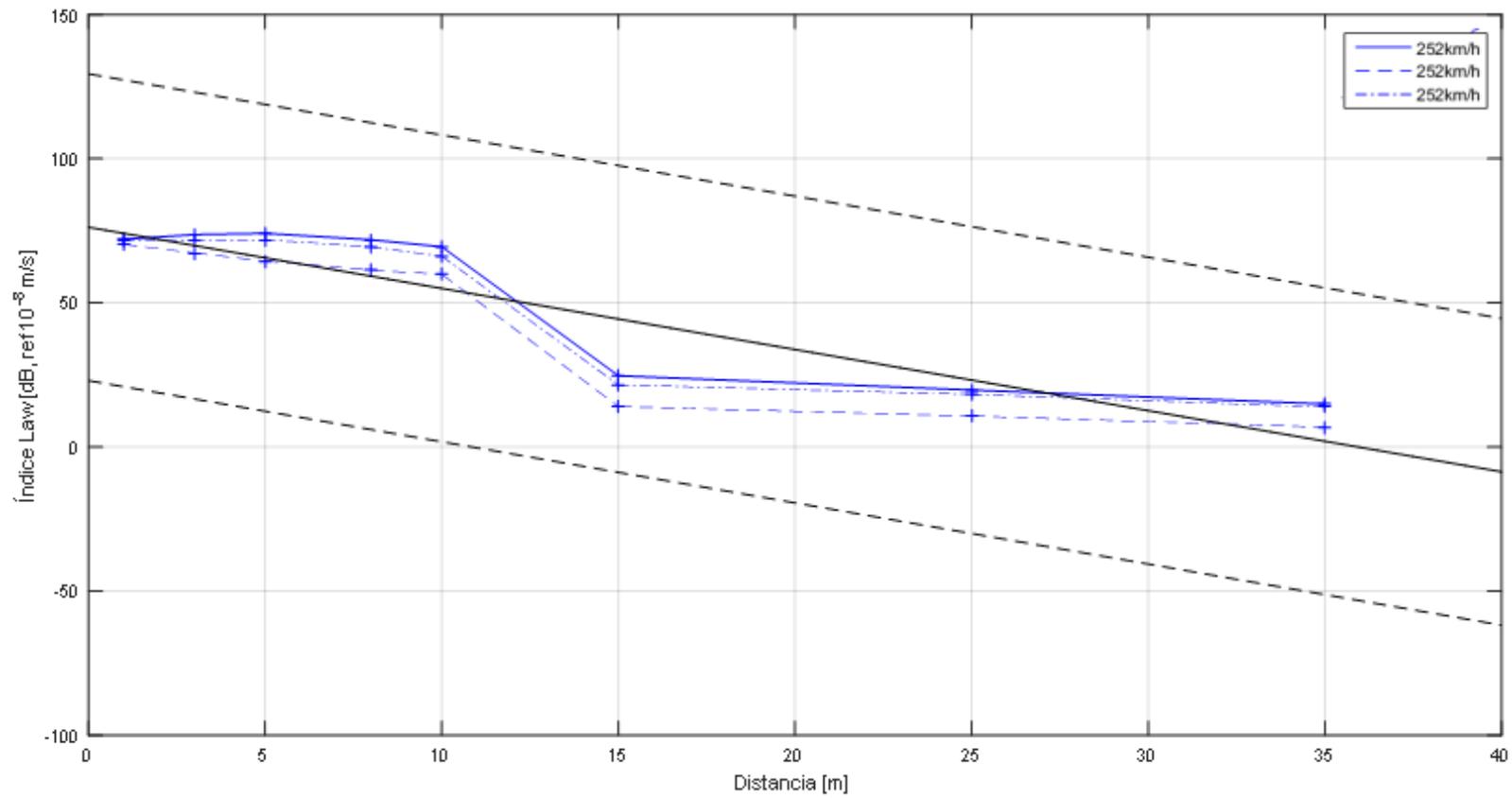


Figura 4-11 Índice Law frente a la distancia al acelerómetro en el ensayo en Arroyo de las Piedras

Si se observa la tabla 4-6 se puede observar cómo para empezar, siendo un ensayo en el que el c_s no varía, midiendo las vibraciones producidas por tres trenes con la misma velocidad y siendo el mismo tipo de tren, se obtienen aceleraciones distintas (muy similares pero no iguales). Esto significa que, aun teniendo las mismas características, las mediciones no son exactas, ya sea por el ruido de fondo, por error del instrumento...

También se puede observar que, el coeficiente de correlación entre la distancia del acelerómetro y la aceleración máxima es muy cercano a -1 (correlación negativa perfecta), lo que quiere decir que existe una relación inversa de proporción constante entre ambas variables.

El segundo de los casos que se va a estudiar es el de Bruselas, en el cual si existen distintas velocidades de paso y distintas distancias a las que se mide.

Tabla 4-8 Media, varianza y coeficiente de correlación los Índices de Law del ensayo de Bruselas

V[km/h]/d[m]	6	8	12	16	24	32	40	56	72	Media	Varianza	Desviación típica	Porcentaje en i. de confianza	Coef. correlación
223	76,3523	75,3590	72,8470	66,1756	69,5035	69,1434	58,6024	57,0836	57,7729	66,9822	57,1325	7,5586	100	-0,9011
256	84,5385	78,3558	76,1948	69,8994	70,5844	68,3744	61,1966	58,2178	56,6100	69,3302	89,2664	9,4481	100	-0,9337
265	76,5379	77,5438	71,5753	66,7631	68,7888	68,4791	59,7322	56,4476	57,1621	67,0033	61,1849	7,8221	100	-0,9168
271	86,0685	78,8587	74,8263	70,3552	71,9682	70,5371	65,5557	61,5453	59,1993	70,9905	70,4143	8,3913	100	-0,9128
272	77,1022	76,1689	73,4085	69,7089	70,8354	69,1451	61,5132	58,2851	57,7305	68,2108	54,0783	7,3538	100	-0,9559
289	86,6542	79,4391	75,1076	72,1694	71,3611	69,9009	62,0525	59,0601	59,6151	70,5956	85,8265	9,2643	100	-0,9089
300	86,8606	81,3229	75,7066	70,3718	71,0282	71,2120	64,9891	61,3043	59,0302	71,3140	81,6550	9,0363	100	-0,9084
302	87,7621	80,4950	76,2018	72,1786	73,0204	70,7250	66,6966	62,0796	59,0675	72,0252	79,3431	8,9075	100	-0,9270
314	77,0240	74,5295	70,4920	65,6626	67,6059	67,8418	61,0213	56,7817	57,2216	66,4645	50,6783	7,1189	100	-0,9170
Media	82,1000	78,0081	74,0400	69,2539	70,5218	69,4843	62,3733	58,9783	58,1566					
Varianza	26,4844	5,3477	4,2922	6,0897	2,7426	1,3722	7,6139	4,6879	1,1739					
Desviación típica	5,1463	2,3125	2,0718	2,4677	1,6561	1,1714	2,7593	2,1652	1,0835					
Porcentaje en i. de confianza	100	100	100	100	100	100	100	100	100					
Coef. Correlación	0,3873	0,3338	0,0456	0,3170	0,1096	0,2453	0,5838	0,3878	0,3588					

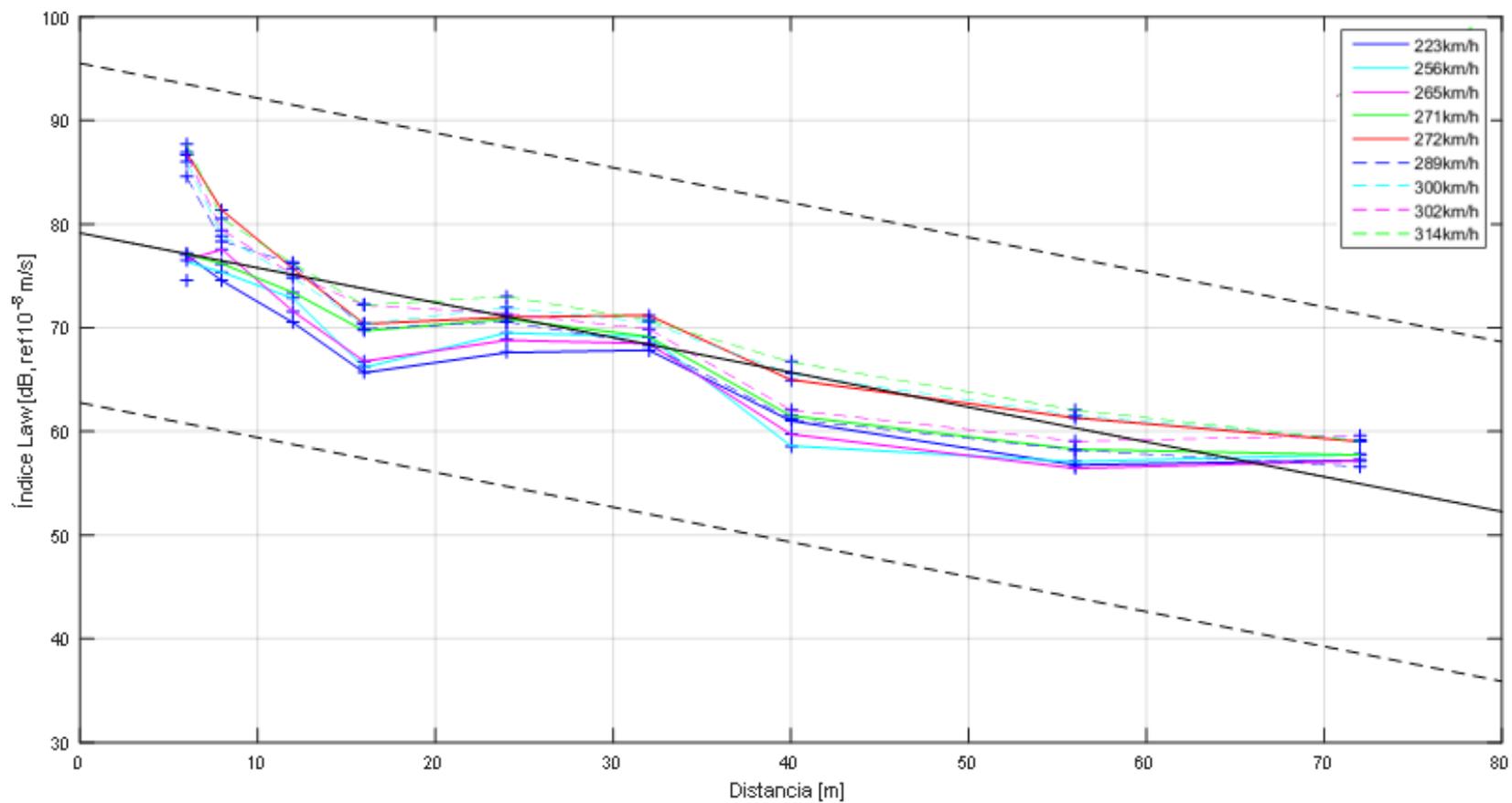


Figura 4-12 Índice de Law frente a la distancia al acelerómetro y velocidad de paso en el ensayo de Bruselas

Lo primero que se puede observar de la tabla 4-7 es que la media de las vibraciones conforme aumenta la distancia va disminuyendo, mientras que con la velocidad va aumentando en general, aunque en el caso de la distancia se puede observar mejor.

En cuanto al coeficiente de correlación se puede observar que, al dejar c_s fijo, los coeficientes de correlación son bastante buenos, aunque mucho más en el caso de la distancia. De aquí se pueden sacar dos conclusiones: el coeficiente c_s influye bastante, ya que al dejarlo fijo aumenta el coeficiente de correlación respecto a la distancia y la velocidad de paso muchísimo; y que la distancia es el factor que más afecta, ya que la correlación que existe entre la distancia y la aceleración es mayor en general que la que existe entre la velocidad del tren y la aceleración.

Se van a presentar ahora los otros dos casos en los que se ha estudiado la velocidad y la distancia a la vez, para sustentar las conclusiones que se han sacado de los otros dos casos que se acaban de estudiar. Estos tres casos son el de Córdoba y el de Reugny.

Se van a presentar primero las dos tablas en las que se ha calculado la media, la varianza y el coeficiente de correlación y después las dos gráficas donde se representan distancias, velocidades y aceleraciones.

Tabla 4-9 Media, varianza y coeficiente de correlación de las aceleraciones producidas por el paso de trenes en Córdoba

D[m]/v[km/h]	3	8,6	11,8	4,8	18,1	21,8	Media	Varianza	Desviación típica	Porcentaje en el i. de confianza	Coef. Correlación
160	83,2921	80,9523	78,1491	77,7877	71,1930	69,9060	76,8801	28,2224	5,3125	100	-0,9205
160	82,3981	78,0803	76,2871	77,0886	71,4533	70,8882	76,0326	18,6656	4,3204	100	-0,9376
160	82,4338	80,9924	79,2767	76,8607	73,0918	76,4397	78,1825	11,5733	3,4020	100	-0,6867
200	83,9149	79,7343	78,3058	79,3761	74,6714	73,8740	78,3128	13,4995	3,6742	100	-0,9438
200	87,2486	83,7835	83,2680	82,2532	78,8642	59,3894	79,1345	100,8413	10,0420	100	-0,8249
200	83,4762	81,4060	79,9896	79,3347	76,4520	72,1243	78,7971	16,0876	4,0109	100	-0,9060
200	87,0040	83,3394	82,0738	81,1689	79,2271	57,9073	78,4534	108,0418	10,3943	100	-0,8053
200	86,5540	83,4134	81,3834	80,4072	76,2163	60,6875	78,1103	84,5096	9,1929	100	-0,8608
200	87,2476	85,7522	82,7693	83,7298	78,5271	58,3972	79,4039	114,7828	10,7137	100	-0,8435
200	-	83,5450	90,8998	32,0959	37,2856	35,6849	55,9023	827,7521	28,7707	40	-0,3030
200	86,0935	84,2013	82,0706	83,0443	77,3278	59,3196	78,6762	98,5283	9,9261	100	-0,8572
200	86,1855	83,9006	82,1851	82,8549	77,3621	58,0385	78,4211	108,1421	10,3991	100	-0,8488
200	91,0327	85,5045	83,1742	84,3477	79,4408	75,4137	81,5762	17,0505	4,1292	100	-0,9367
250	86,4523	84,9879	83,2654	81,6948	77,2945	74,7479	81,4071	20,6142	4,5403	100	-0,8929
250	89,1597	87,6457	85,5741	84,3418	81,1158	79,0161	84,4755	14,8618	3,8551	100	-0,8825
300	93,4551	94,3609	93,5755	89,6665	82,0934	80,3539	88,9175	38,4767	6,2030	100	-0,8311
Media	86,3966	83,8500	82,6405	78,5033	74,4760	66,3868					
Varianza	9,7822	13,7317	19,8391	163,6682	108,0889	133,8722					
Desviación típica	3,1277	3,7056	4,4541	12,7933	10,3966	11,5703					
Porcentaje en el i. de confianza	100	100	100	93,75	93,75	93,75					
Coef. Correlación	0,7916	0,8798	0,7657	0,2490	0,2750	0,2761					

Tabla 4-10 Media, varianza y coeficiente de correlación de las aceleraciones producidas por el paso de trenes en Reugny

V[km/h]/D[m]	12	32	56	72	Media	Varianza	Desviación típica	Porcentaje en el i. de confianza	Coef. Correlación
238	85,2712539	67,2819732	61,9095842	53,2582722	52,9231448	182,882065	13,52338956	75	-0,9653301
255	88,6612332	70,777608	63,0708895	57,0641755	54,1861746	188,04968	13,71312072	75	-0,9686104
256	89,0403322	69,8081553	62,5469233	55,5756957	55,2194926	207,962137	14,42089238	75	-0,96577
Media	87,6576064	69,2892455	62,5091323	55,2993811					
Varianza	4,30693781	3,2568162	0,33822859	3,67848729					
Desviación típica	2,07531632	1,80466512	0,58157423	1,91793829					
Porcentaje en el i. de confianza	0	100	100	100					
Coef. Correlación	0,99911746	0,94879968	0,86943383	0,90133577					

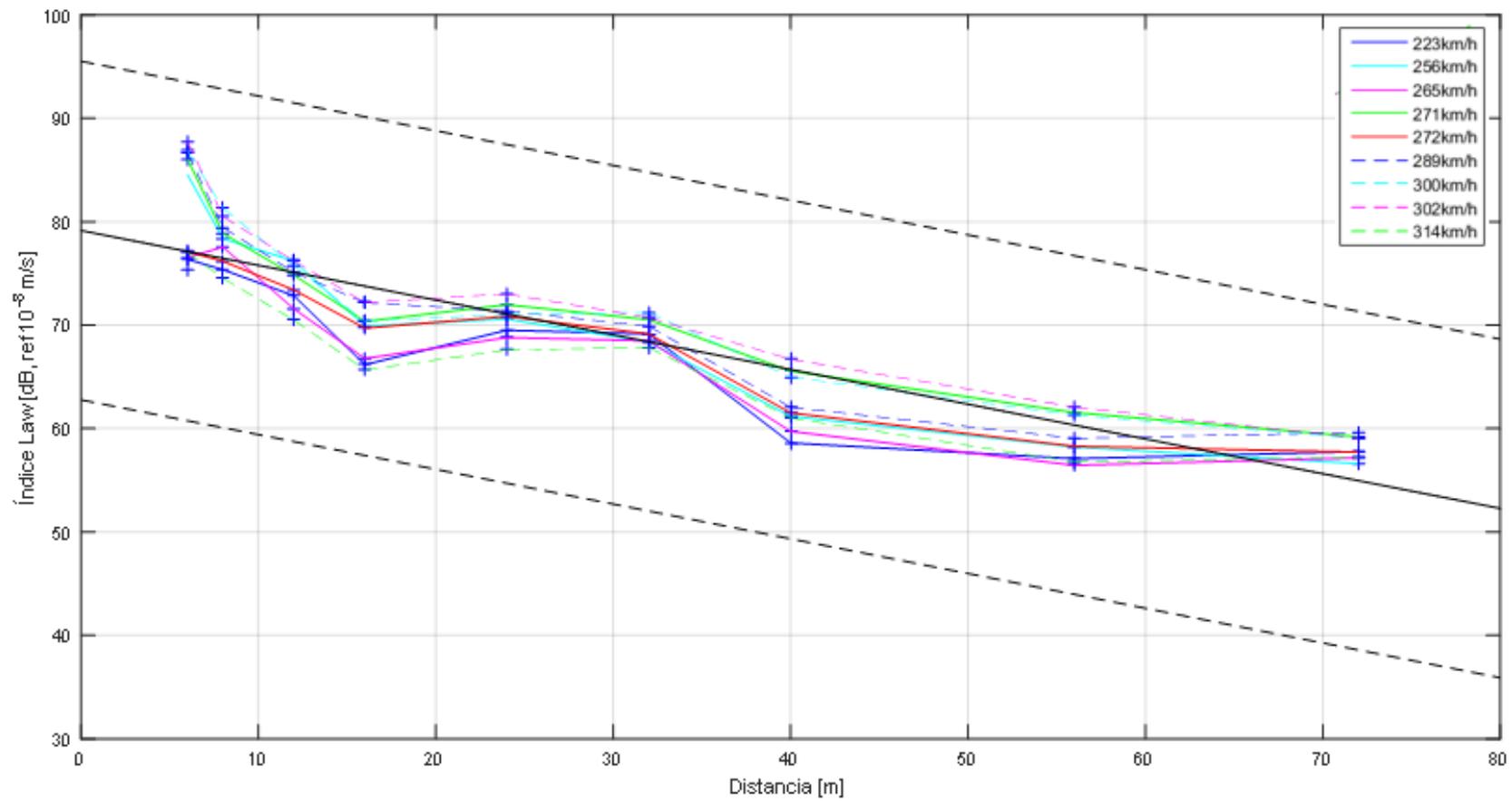


Figura 4-13 Índice de Law frente a la distancia al acelerómetro y velocidad de paso en el ensayo de Córdoba

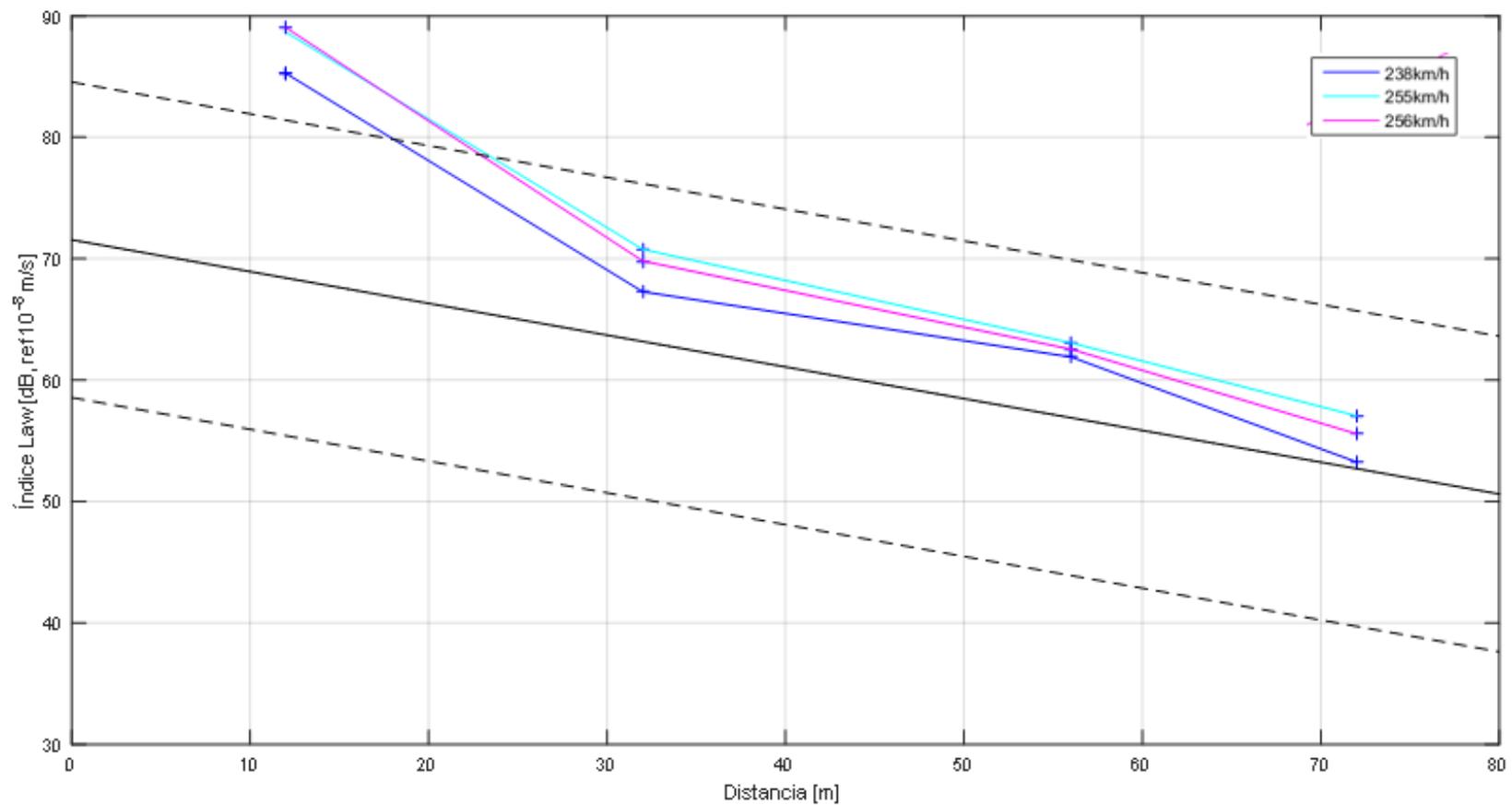


Figura 4-14 Índice Law frente a la distancia al acelerómetro y velocidad de paso en el ensayo de Reugny

De estas dos gráficas y tablas se pueden sacar las mismas conclusiones que se han sacado de los dos primeros casos.

4.7 Velocidad de paso y velocidad de propagación de las ondas S del suelo

Las siguientes dos variables que se van a estudiar a la vez son la velocidad de paso del tren y velocidad de propagación de ondas S del suelo. Se han representado estas dos variables en función el Índice de Law, que es el indicador que se ha elegido para este caso. Para representar estas dos variables se ha dejado como valor constante la distancia del acelerómetro, el caso elegido es en el que la distancia es de 15m.

Se ha graficado la velocidad junto con el coeficiente c_s del terreno, obteniéndose el siguiente resultado:

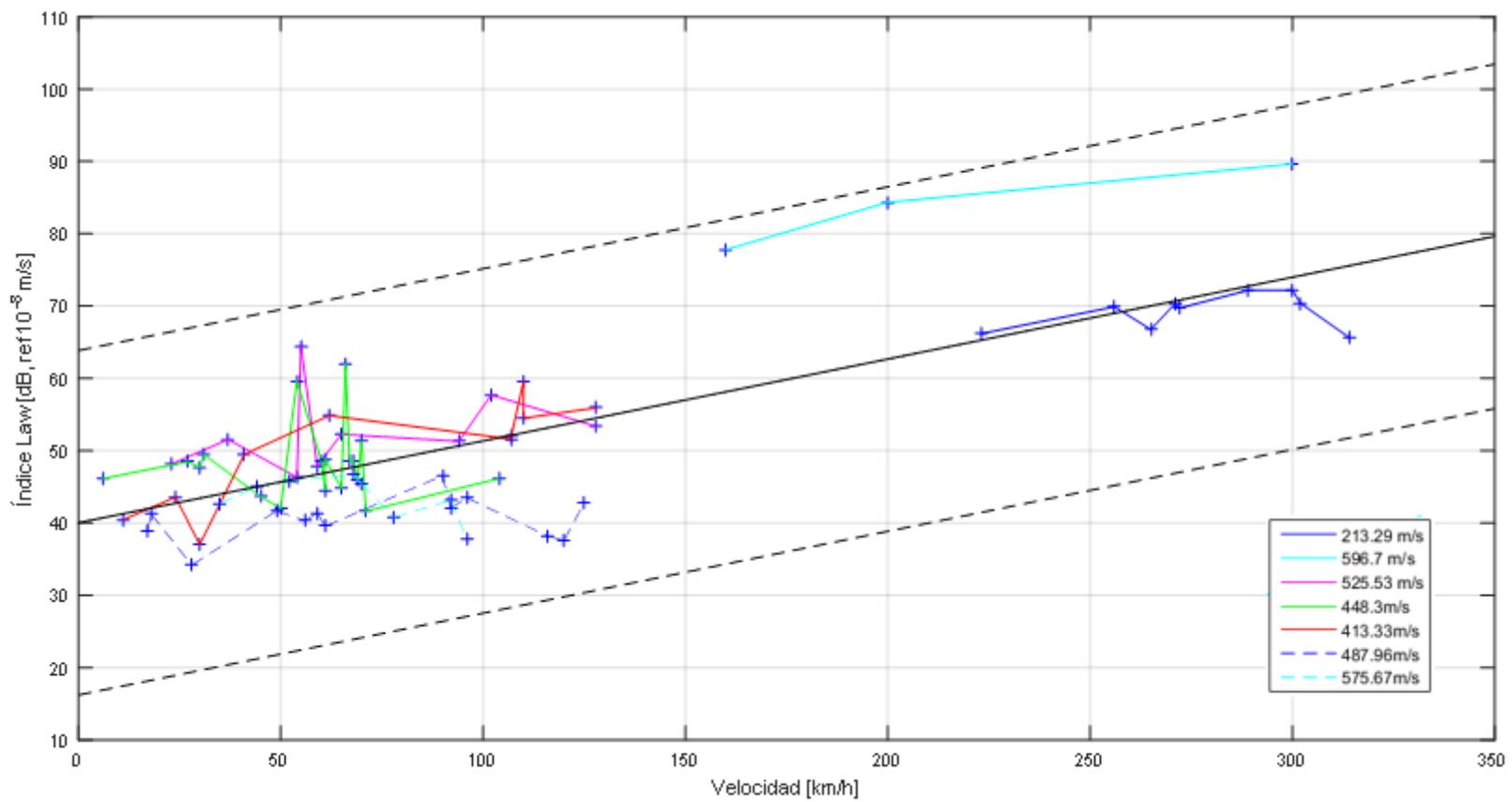


Figura 4-15 Índice Law frente al coeficiente c_s del terreno y velocidad de paso, para una distancia de 15m

Se ha calculado también la media, la varianza y el coeficiente de correlación respecto al suelo y al coeficiente c_s del terreno.

Tabla 4-11 Media, varianza, desviación típica y coeficiente de correlación del Índice Law para una distancia de 15m

Media	Varianza	Desviación típica	Coef. Correlación c_s	Coef correlación velocidad	Porcentaje en el i. de confianza
51,29	141,79	11,9077	-0.4085	0.7821	100

Lo primero que se puede observar que, al ser el coeficiente de correlación del Índice de Law y la velocidad de paso positivo, es que, como ya se ha explicado antes, la vibración aumenta proporcionalmente a la velocidad de paso. Por otro lado, se puede observar como la vibración disminuye al aumentar el coeficiente c_s , hecho que no se podía observar sin la distancia fija.

En el apartado 4.4 se llegaba a la conclusión de que el coeficiente c_s del suelo no tenía una incidencia directa en el nivel de vibración medido en los ensayos. Donde sí se puede observar la influencia del coeficiente c_s es cuando dejamos fija la distancia (factor que más influye en la vibración).

En el apartado 4.3 se mencionaba la Tesis doctoral de Pedro Galvín Barrera, “Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía”, en la cual se explica cómo las vibraciones aumentan al acercarse la velocidad de paso a la velocidad crítica del tren (la cual se encuentra entre la velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh y la velocidad de propagación de las ondas S en el suelo). El problema que se presenta en el estudio es que sólo existe un caso de velocidad de paso en el que es superior a la velocidad de propagación de ondas S, que es en el caso de Bruselas cuyo suelo tiene un coeficiente medio de velocidad de propagación de ondas $c_s=213.29\text{m/s}$. En el resto de casos la velocidad del tren es mucho menor que la velocidad de propagación de ondas S. Por lo que, en el presente estudio sólo se puede concluir que, al aumentar la velocidad aumentan las vibraciones medidas, ya que en la mayoría de los casos la velocidad de propagación de las ondas es mucho mayor, por lo que conforme aumenta la velocidad de paso del tren, el valor se va acercando al de propagación de onda.

4.8 Distancia del acelerómetro y velocidad de propagación de las ondas S del suelo

Las últimas dos variables que se van a estudiar a la vez son la distancia del acelerómetro y velocidad de propagación de ondas S del suelo. Se han representado estas dos variables en función el Índice de Law, que es el indicador que se ha elegido para este caso.

Estas dos variables se han estudiado dejando como valor fijo la velocidad de paso del tren para tres casos: $v=50\text{km/h}$, $v=100\text{km/h}$ y $v=250\text{km/h}$. Se han elegido estos valores de velocidad porque son las velocidades para las que los grupos de datos eran mayores. Para cada caso se han tomado valores de velocidad 10km/h por encima y 10 km/h por debajo para aumentar el número de casos.

Las gráficas obtenidas son las siguientes:

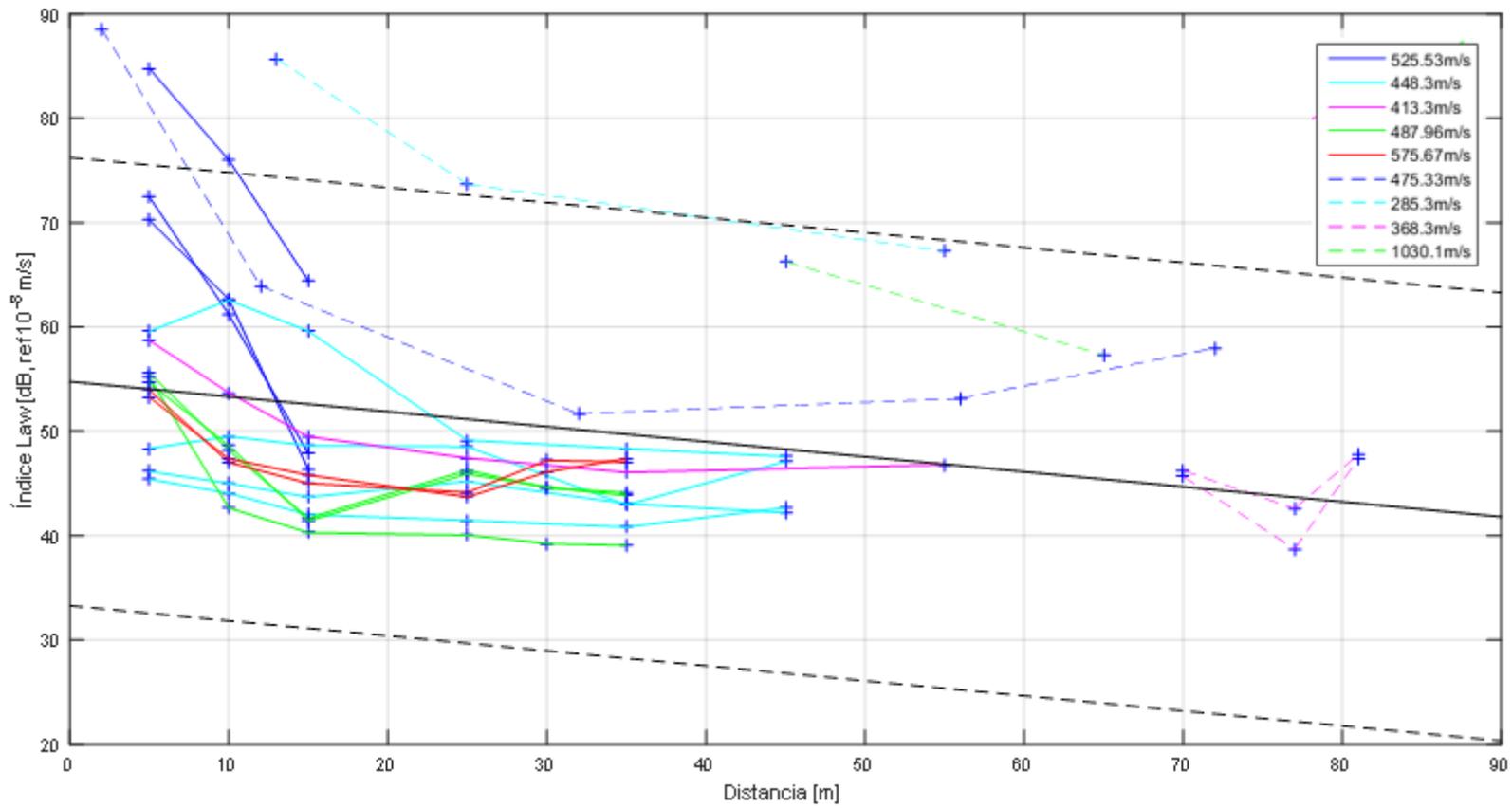


Figura 4-16 Índice Law frente al coeficiente c_s del terreno y la distancia del acelerómetro, para una velocidad de 50km/h

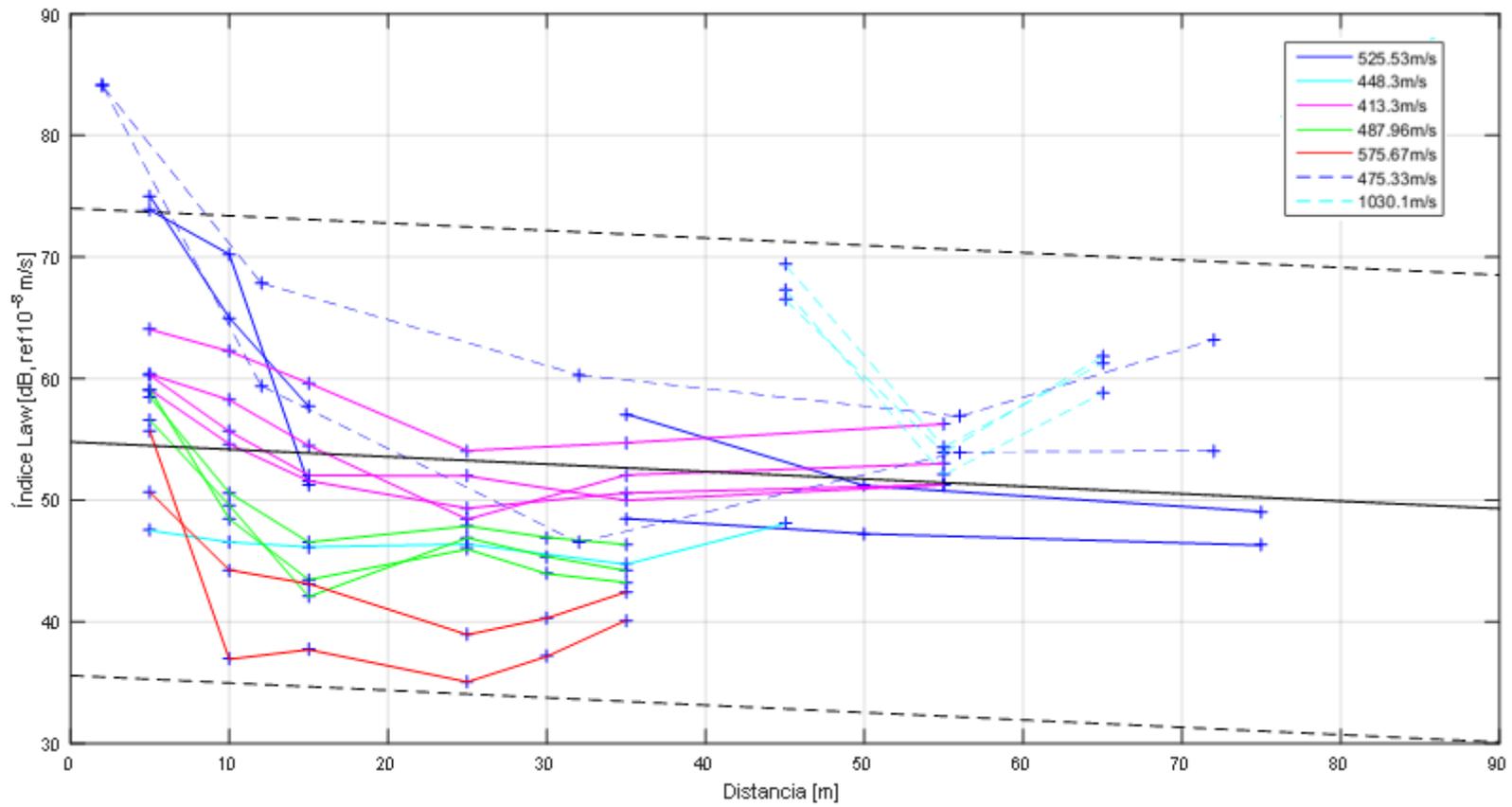


Figura 4-17 Índice Law frente al coeficiente c_s del terreno y la distancia del acelerómetro, para una velocidad de 100km/h

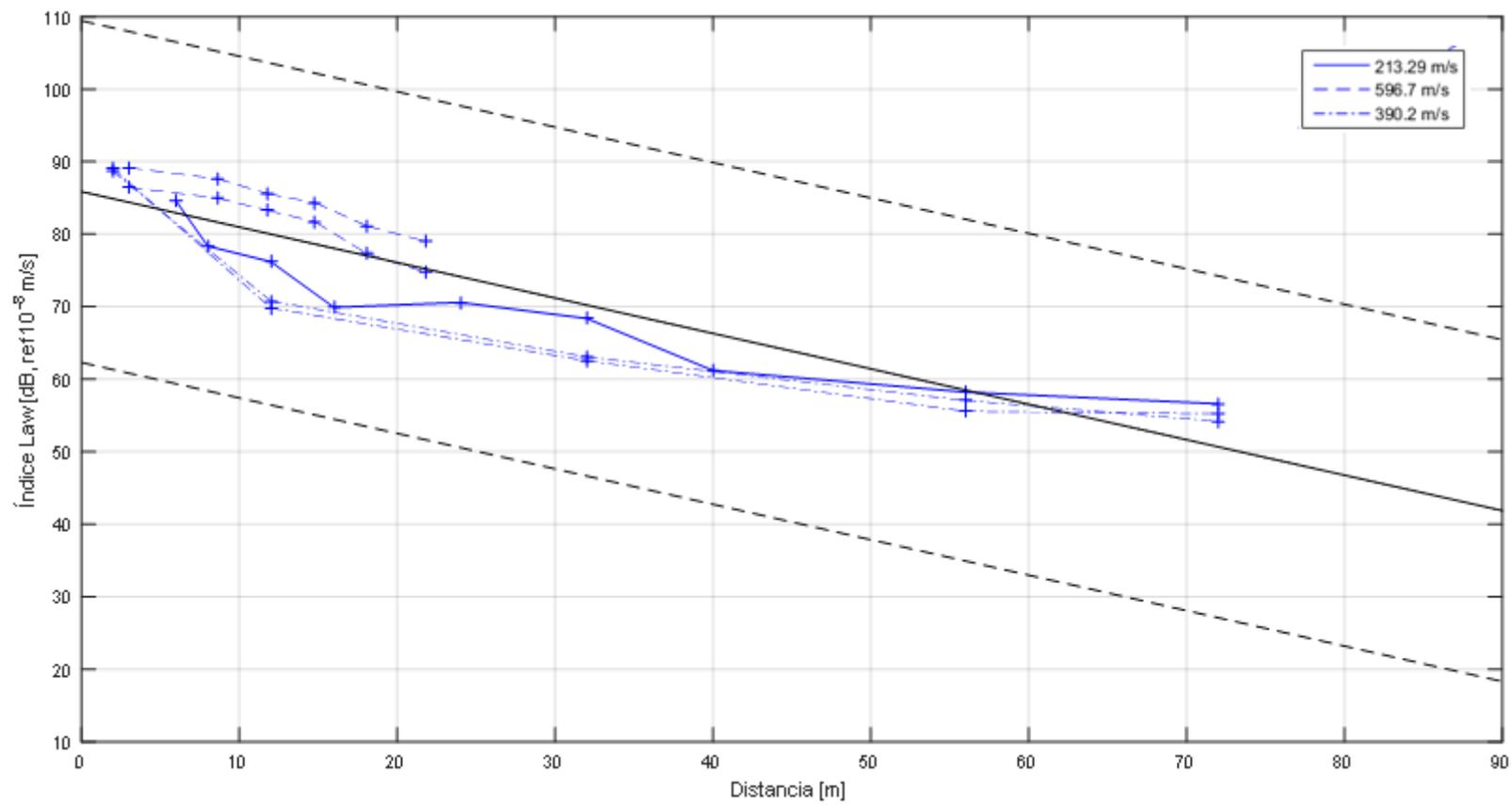


Figura 4-18 Aceleración máxima frente al coeficiente c_s del terreno y la distancia del acelerómetro, para una velocidad de 250km/h

Se han calculado también la media, la varianza y el coeficiente de correlación de las vibraciones.

Tabla 4-12 Media, varianza y coeficiente de correlación del Índice Law para una velocidad de 50km/h

Media	Varianza	Desviación típica	Porcentaje en el i. de confianza	Coef. Correlación c_s	Coef. Correlación distancia
51,05	115,32	10,74	94,18	0,0545	-0,2762

Tabla 4-13 Media, varianza y coeficiente de correlación del Índice Law para una velocidad de 100km/h

Media	Varianza	Desviación típica	Porcentaje en el i. de confianza	Coef. Correlación c_s	Coef. Correlación distancia
53,09	92,27	9,61	95,60	0,1613	-0,1269

Tabla 4-14 Media, varianza y coeficiente de correlación del Índice Law para una velocidad de 250km/h

Media	Varianza	Desviación típica	Porcentaje en el i. de confianza	Coef. Correlación c_s	Coef. Correlación distancia
73,71	138,81	11,78	100,00	0,5277	-0,9074

Lo primero que se puede observar es que, ocurre lo contrario a lo explicado en el apartado anterior, las vibraciones aumentan al aumentar el coeficiente c_s del suelo. Esto ocurre debido a que, al estar ligado el coeficiente c_s con la velocidad, si dejamos la velocidad fija, la influencia del coeficiente c_s carece de sentido. Además, si se observa el caso de velocidad de 50km/h se puede ver como el coeficiente de correlación es muy pequeño, mucho más pequeño que cuando se dejaba la distancia como factor fijo. Esto es una prueba más de cómo la distancia es el valor que más influye en la vibración.

En cuanto al coeficiente de correlación entre la distancia y las vibraciones, se puede seguir observando lo mismo que a lo largo que todo el trabajo, aunque algo más bajo que en otros casos.

5 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

A lo largo de las últimas dos décadas ha surgido un importante interés por conocer y atenuar las vibraciones producidas por el paso de trenes. Este interés se ha plasmado en distintos trabajos en los que se ha basado este estudio (como bien se ha podido observar en el Capítulo 2). Estos trabajos se basaban en conocer cómo y en qué medida afectaban distintos factores a las vibraciones producidas. Hay factores que a priori se podía conocer cómo afectaban, pero no cuanto ni cómo interactuaban con los otros factores.

Después de todo el análisis realizado, se pueden realizar las siguientes reflexiones.

La distancia es la variable que, a priori, tiene más peso en cuanto al nivel de vibración se refiere, ya que en todas las gráficas se ha mostrado cómo siempre todos los niveles máximos de vibración se daban para puntos no muy alejados de la vía. El coeficiente de correlación ha tenido siempre un valor muy alto en todos los casos estudiados.

La velocidad y el coeficiente de propagación de ondas están relacionados, pero, al no tener para un mismo suelo (mismo c_s) velocidades que estén por encima y por debajo de c_s , no se puede apreciar su influencia. Sin embargo, como se ha presentado antes, al ser las velocidades en la mayoría de los casos, menores que c_s , al ir aumentando la velocidad (al ir acercándose a c_s) aumenta el nivel de vibración. Sería de interés también estudiar el caso en el que la velocidad aumenta alejándose de c_s y ver cómo varía.

El coeficiente c_s es un factor que, como se ha dicho, afecta a la velocidad, pero como se ha podido observar en la comparación con la distancia, al aumentar la velocidad de propagación de ondas S , disminuye el nivel de las vibraciones, debido a que en principio tendría una velocidad crítica mayor, haciendo que las velocidades estén más alejadas de la velocidad crítica y haciendo que disminuyan las vibraciones.

El tipo de tren es una variable que influye poco, y para estudiarlo habría que tener un ensayo más concreto.

Este trabajo se puede utilizar también para comparar los distintos índices que se usan para medir las vibraciones:

En cuanto al número de datos que se encuentran dentro del intervalo de confianza (tabla 5-1) se puede observar como todos tienen un valor bastante alto, por lo que este dato no es relevante a la hora de comparar índices:

Tabla 5-1 Porcentaje de puntos (%) dentro del intervalo de confianza a la hora de representar Aceleración máxima, Índice Law e Índice K frente a la distancia, la velocidad de paso y el c_s medio del suelo

	Aceleración máxima	Índice Law	Índice
Distancia	96,2252	96,3873	95,5499
Velocidad	95,5854	98,1214	96,3764
Cs medio	92,8063	96,3082	92,5743

Por otro lado, en el caso del coeficiente de desviación se obtiene la siguiente tabla (5-2):

Tabla 5-2 Coeficiente de desviación de Aceleración máxima, Índice Law e Índice respecto a la distancia, la velocidad de paso y el c_s medio del suelo

	Aceleración máxima	Índice Law	Índice K
Distancia	-0,4498	-0,3492	-0,2661
Velocidad	0,2517	0,6226	0,425
C_s medio	-0,0444	-0,0073	0,0245

De esta tabla se pueden sacar distintas conclusiones:

- Para representar la variación respecto la distancia el mejor indicador es la aceleración, aunque los otros dos indicadores son también bastante representativos.
- Para representar la variación respecto a la velocidad, el índice Law es el mejor indicador.
- El c_s medio no tiene una influencia a priori clara, por lo que se puede sacar ninguna conclusión en este caso.

Por último, a la hora de comparar los distintos índices, se ha calculado la dispersión relativa o coeficiente de variación, para observar que coeficiente es el que ofrece menos dispersión de los resultados. Se ha calculado como la desviación estándar entre la media aritmética, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 5-3 Coeficiente de variación de Aceleración máxima, Índice Law e Índice respecto a la distancia, la velocidad de paso y el c_s medio del suelo

	Aceleración máxima	Índice Law	Índice K
Coeficiente de variación (%)	8,423326134	35,95674894	228,2954545

Se puede observar en la tabla 5-2 como el índice que ofrece menos variación es la aceleración máxima.

En definitiva, el índice que se debería elegir para representar la cómo varían las vibraciones respecto a algún parámetro, depende del parámetro que se vaya a elegir, aunque todos ofrecen unos buenos resultados.

Como última reflexión, decir que, al ser los ensayos de los que se ha partido muy distintos (velocidades muy distintas, distancias distintas...) no se puede observar con claridad la influencia de las variables en el nivel de vibración. Si se compara con un caso ideal, en el que se tuviera ensayos en distintos lugares con los mismos trenes a las mismas velocidades y abarcando estas un rango más o menos mayor y medidas las aceleraciones a la misma distancia, se podría obtener una idea más clara de la influencia de cada parámetro. De todas formas, con los datos de partida de los que se disponía, y al ser un estudio estadístico, se puede observar la influencia de los parámetros en una medida bastante aceptable.

Lo último a destacar es que, como desarrollo posterior a este trabajo, se podría realizar otro de la misma forma, pero aumentando el número de datos, para poder estudiar mejor la influencia del coeficiente c_s del suelo y del tipo de tren, que son los datos de los que menos conclusiones se ha podido sacar, ya que la variabilidad de estos en los ensayos utilizados es muy poca.

1. Código de MATLAB

```
%Tratamiento de datos
%Manuel Jesús Cartes Cumbreiras
close all
clear
clc
addpath ./toolbox
estructuras=['bruselas';...
    'cordarro';...
    'cordcord';...
    'cordecil';...
    'pale10aa';...
    'pale10bb';...
    'pale10cc';...
    'pale11aa';...
    'pale11bb';...
    'pale11cc';...
    'reugnyfr';...
    'saintepa';...
    'zamozo11';...
    'zamozo21';...
    'zamozo61';...
    'orens4_1';...
    'orens6_1';...
    'orens7_1'];

procetime=1;
procefreq=1;
proceterc=1;
procelaw=1;

nestr = size(estructuras,1);

titles=char('time',...
    'freq',...
    'terc',...
    'law');

for iestr=1:nestr
    load(estructuras(iestr,:));

    datafolder=eval(strcat(estructuras(iestr,:),'.dirdata'));
    datafile=strcat(datafolder,'data');
    load(datafile);

    ntrain=size(data,1);
    ndista=size(data,2);
    ndire=size(data,3);
    nt=size(data,4);

    distance=eval(strcat(estructuras(iestr,:),'.distance'));
    v=eval(strcat(estructuras(iestr,:),'.speed'));
```

```

nametrain=eval(strcat(estructuras(iestr,:),'.train'));
cs=eval(strcat(estructuras(iestr,:),'.soil.cs'));
cp=eval(strcat(estructuras(iestr,:),'.soil.cp'));
h=eval(strcat(estructuras(iestr,:),'.soil.h'));
dam=eval(strcat(estructuras(iestr,:),'.soil.dam'));
unit=eval(strcat(estructuras(iestr,:),'.unit'));

fs=eval(strcat(estructuras(iestr,:),'.fs'));
time=1/fs:1/fs:1/fs*nt;

%Dominio del tiempo
%Pinta las figuras y las guarda si proctime==1

if proctime
    for itrain=1:ntrain
        for idista=1:ndista
            for idir=1:ndire

                idata = squeeze(data(itrain,idista,idir,:));

                if max(abs(idata))>0

                    figure
                    plot(time,squeeze(data(itrain,idista,idir:)),...
                        'Color',[0.0 0.0 0.0],'LineWidth',1,'LineStyle','-')

[a,b]=max(abs(squeeze(data(itrain,idista,idir:))));
                    xlabel('Time [s]')
                    if unit=='acel'
                        ylabel('Acceleration [m/s^2]')
                    else if unit=='velo'
                        ylabel('Velocity [m/s]')
                    end
                    end
                    if (a>0)
                        ylim([-a*1.2 a*1.2])
                        xlim([(b/fs-5) (b/fs+5)])
                    end
                    legend(strcat(nametrain(itrain,:), ' Dist '...
                        ,int2str(distance(idista)), ' Dir ',int2str(idir))
                    title(strcat(estructuras(iestr,:))
                    print('-djpeg',strcat(estructuras(iestr,:),...

'_' ,nametrain(itrain,:), '_' ,int2str(itrain), '_Dist_',...

num2str(round(distance(idista)), '_Dir_', int2str(idir)...
, ' ',titles(1,:))

                    end
                end
            end
        end
    end

%Dominio de la frecuencia
%Pinta las figuras y las guarda si procfreq==1

DATAF=zeros(ntrain,ndista,ndire,nt);
%Filtrado
%Response below 125Hz

```

```

maxfreq=125;
ChebyOrder1=3;
ChebyRipple1=0.1;
ChebyFreq1=maxfreq;

if ChebyFreq1/fs*2 == 1
    ChebyFreq1 = ChebyFreq1-1e-3;
end

[Bf1,Af1]=cheby1(ChebyOrder1,ChebyRipple1,ChebyFreq1/fs*2, 'low');

%Response above 1Hz
ChebyOrder2=3;
ChebyRipple2=0.1;
ChebyFreq2=1;
[Bf2,Af2]=cheby1(ChebyOrder2,ChebyRipple2,ChebyFreq2/fs*2, 'high');

freq=fs/nt:fs/nt:fs;
for itrain=1:ntrain
    for idista=1:ndista
        for idir=1:ndire
            idata=squeeze(data(itrain,idista,idir,:));
            idata=filter(Bf2,Af2,idata,[],1);
            idata=filter(Bf1,Af1,idata,[],1);

            if max(abs(idata))>0

                DATAF(itrain,idista,idir,:)=fft(idata);

            end
        end
    end
end
savefile=strcat(datafolder,'dataf');
save(savefile,'DATAF','freq','fs');

if procefreq
    for itrain=1:ntrain
        for idista=1:ndista
            for idir=1:ndire

                idata = squeeze(data(itrain,idista,idir,:));

                if max(abs(idata))>0

                    figure

plot(freq,squeeze(abs(DATAF(itrain,idista,idir,:)))/fs...
        , 'Color',[0.0 0.0
0.0]), 'LineWidth',1, 'LineStyle','-')

[a,b]=max(abs(squeeze(DATAF(itrain,idista,idir,:)))/fs);
    xlabel('Frequency [Hz]')
    if unit=='acel'
        ylabel('Acceleration [m/s^2/Hz]')
    else if unit=='velo'
        ylabel('Velocity [m/s/Hz]')
    end
end
end
end

```



```

        idata = squeeze(data(itrain,idista,idir,:));

        if max(abs(idata))>0

            figure

            semilogx(b,20*log10(abs(squeeze(DATA3(itrain,idista,...
                idir,:))/ref)), 'Color',...
                [0.0 0.0 0.0], 'LineWidth',1, 'LineStyle', '-')
            [a,~]=max(20*log10(abs(squeeze(DATA3(itrain,...
                idista,idir,:))/ref)));
            xlabel('One-third octave band [Hz]')
            if unit=='acel'
                ylabel('Acceleration [dB, ref 10^{-6} m/s^2]')
            else if unit=='velo'
                ylabel('Acceleration [dB, ref 10^{-8}
m/s]')
            end
            end
            if(a>0)
            ylim([0 a*1.2])
            xlim([0 maxfreq])
            end
            legend(strcat(nametrain(itrain,:), ' Dist ',...
                int2str(distance(idista)), ' Dir',int2str(idir))
                title(strcat(estructuras(iestr,:))
                set(gca, 'xtick',[1 1.6 2.5 4 6.3 10 16 25 40 63 100 ...
                125], 'XScale','log', 'XMinorTick','off')

            print('djpeg',strcat(estructuras(iestr,:), '_ ',nametrain(itrain,:),...
                '_ ',int2str(itrain), '_ Dist_', num2str(round(distance...
                (idista))), '_ Dir_', int2str(idir), ' ', titles(3,:)))

            end
            end
            end
            end

            %Indice Law
            %Pinta las figuras y las guarda si procelaw==1

            if unit=='acel'
                ref=1e-6;
            else if unit=='velo'
                ref=1e-8;
            end
            end
            clear DATAlaw Law DATAlawG LawG
            for itrain=1:ntrain
                for idista=1:ndista
                    for idir=1:ndire
                        idata=squeeze(data(itrain,idista,idir,:));
                        idata=filter(Bf2,Af2,idata,[],1);
                        idata=filter(Bf1,Af1,idata,[],1);

                        idata = squeeze(data(itrain,idista,idir,:));

                        if max(abs(idata))>0

```

```

[DATAalaw(itrain,idista,idir,:),tlaw]=iLaw1(idata,fs);
Law(itrain,idista,idir)=max(20*log10...
(abs(squeeze(DATAalaw(itrain,idista,idir,:))/ref)));

    end
end
if ndire==3 && idir==3 && max(abs(idata))>0
    DATAalawG(itrain,idista,:)=20*log10(sqrt(DATAalaw...
(itrain,idista,1,:).^2+DATAalaw(itrain,...
idista,2,:).^2+DATAalaw(itrain,idista,3,:).^2)/ref);
    LawG(itrain,idista)=max(DATAalawG(itrain,idista,:));
end
end
savefile=strcat(datafolder,'datalaw');

if ndire==3
    save(savefile,'DATAalaw','tlaw','Law','DATAalawG','LawG');
else
    save(savefile,'DATAalaw','tlaw','Law');
end

if procelaw
    for itrain=1:ntrain
        for idista=1:ndista
            for idir=1:ndire

                idata = squeeze(data(itrain,idista,idir,:));

                if max(abs(idata))>0

                    figure
                    plot(tlaw,20*log10(abs(squeeze(DATAalaw...
(itrain,idista,idir,:))/ref)), 'Color',...
[0.0 0.0 0.0], 'LineWidth',1, 'LineStyle', '-')
                    [a,b]=max(20*log10(abs(squeeze...
(DATAalaw(itrain,idista,idir,:))/ref)));
                    xlabel('Time [s]')
                    if unit=='acel'
                        ylabel('Acceleration [dB, ref 10^{-6} m/s^2]')
                    else if unit=='velo'
                        ylabel('Acceleration [dB, ref 10^{-8}
m/s]')
                    end
                    end
                    if(a>0)
                        ylim([0 a*1.2])
                        xlim([(b/fs-5) (b/fs+5)])
                    end
                    legend(strcat(nametrain(itrain,:), ' Dist ',...
int2str(distance(idista)), ' Dir ',int2str(idir)))
                    title(strcat(estructuras(iestr,:))
                    print('-djpeg',strcat(estructuras(iestr,:), '_ ',...

nametrain(itrain,:), '_ ',int2str(itrain), '_ Dist_',...
num2str(round(distance(idista))),...
'_ Dir_',int2str(idir), ' ',titles(4,:))

                    end

```

end
end
end
end
end

REFERENCIAS

- [1] P. Galvín, Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía. 2007
- [2] A. Romero, Predicción, medida experimental y evaluación de las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario. 2012
- [3] G. Lombaert, P. Galvín, G. Degrande. Prediction of railway induced vibrations at a site in Saint-Épain (France). 2009
- [4] G. Lombaert, P. Galvín, G. Degrande. Prediction of railway induced vibrations at a site in Reugny (France). 2009
- [5] P. Galvín, J. Domínguez. Vibraciones ocasionadas en el suelo por el paso de una locomotora. 2006
- [6] G. Degrande. Free field vibration measurement during the passage of a Thalys high speed train 2002
- [7] D.P. Connolly, P. Alves Costa, G. Kouroussis, P. Galvín, P.K. Woodward, O. Laghrouche. Large scale international testing of railway ground vibrations across Europe. Journal El sevier.
- [8] <http://www.matlab.com>
- [9] España. Ley orgánica 37/2003, de 17 de noviembre. *Boletín Oficial del Estado*, 18 de noviembre de 2003, núm. 276, páginas 40494 a 40505.
- [10] España. Real decreto 1367/2007, de 19 de octubre. *Boletín Oficial del Estado*, 23 de octubre de 2007, núm. 254, páginas 42952 a 42973.
- [11] UNE EN ISO 2631-1. 1997. Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: General requirements.
- [12] UNE EN ISO 2631-2. 1989. Estimation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps-Partie 2: Vibrations continues et induites par les chocs dans les bâtiments (1 à 80 Hz)
- [13] UNE EN ISO 2631-2. 2003. Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 2: Vibration in buildings (1Hz to 80 Hz)
- [12] <http://www.renfe.com>
- [13] William Navidi. Estadística para ingenieros y científicos. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- [14] <https://cadenaser.com>