

# Resultados sobre la regularidad longitudinal obtenidos en el experimento FILTER



Equipos participantes en el experimento FILTER.

Por MARIA ALONSO ANCHUELO INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS, DIRECTORA DE NORMALIZACIÓN Y NUEVAS TECNOLOGÍAS, CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS DEL CEDEX, Y FRANCISCO ACHÚTEGUI VIADA, DOCTOR INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS, JEFE DEL SECTOR DE EVALUACIÓN A ESCALA REAL, CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS DEL CEDEX.

## Introducción

El proyecto FILTER (FEHRL Investigation of Longitudinal and Transverse Evenness of Roads) fue organizado y desarrollado por el FEHRL

(Forum of European National Highway Research Laboratories - Foro de Laboratorios Europeos Nacionales de Investigación de Carreteras), como parte de un proyecto más amplio organizado por la AIPCR (Asociación Mundial de Carreteras) denominado EVEN.

El proyecto EVEN se concibió para armonizar las medidas de regularidad longitudinal y transversal de las carreteras utilizando los equipos de alto rendimiento que operan actualmente en todo el mundo. Estos equipos son capaces de integrarse en la corriente del tráfico y proporcionar datos para reproducir la geometría de la superficie del firme; y, a partir de ellos, una serie de índices de regularidad. Para ello, el Comité 1 de la AIPCR decidió realizar tres

experimentos en diferentes regiones, concretamente en América (Arizona-EE.UU.), Asia (Hokaido-Japón) y Europa (Alemania y los Países Bajos). Cada país organizador debía seguir las directrices marcadas por el Comité de la AIPCR, pero tenía capacidad para decidir todo lo relacionado con la organización del experimento.

En el experimento europeo, la organización, el desarrollo y el posterior análisis de los datos formaron parte del proyecto FILTER llevado a cabo por el FEHRL. Este proyecto, aunque incluía también ciertos análisis teóricos de gran interés, ha estado dedicado, en buena parte, al análisis de la información proporcionada por los participantes (perfiles e indi-



**Tabla 1: Equipos de medida de regularidad incluidos en el inventario**

Nombre del equipo	Propietario	Regularidad long.	Regul. transv.	Responsable
Perfilógrafo GREENWOOD	CEDEX	X	X	F. Achútegui
Perfilógrafo GREENWOOD	ELSAMEX	X		J. Mantos
Laser Portable RST PT2	AEPO S.A.	X		R. Crespo
Valeo Laser RSTII	AEPO S.A.	X	X	R. Crespo
KILAW T6500	GEOCISA	X	X	G. Albrecht

ces de regularidad, tanto longitudinales como transversales). Los equipos debían medir en 12 tramos de ensayo (5 de ellos en la pista de ensayo de camiones de la empresa DAF, y el resto en carretera). Las medidas se tomaron a 3 velocidades distintas (a 60 km/h, a 90 km/h y a la velocidad óptima de cada equipo), realizándose tres pasadas a cada velocidad. Los participantes enviaron a la organización sus datos de perfiles y de índices. En el caso de los índices longitudinales, se debían calcular cada 50, 100, 200, 300, 400 y 500 m. El grupo de trabajo del FEHRL se ha encargado del análisis de estos datos, cuyos resultados se han publicado en diversos informes.

Dado que la descripción de los proyectos EVEN y FILTER se publicó con cierto detalle en la revista RUTAS nº 85 [10], este artículo únicamente se ocupa del análisis de los datos y de los resultados obtenidos por los equipos en el experimento FILTER relativos a las medidas de regularidad longitudinal (tanto perfiles como índices). Además, se mencionan brevemente algunas de las características de los equipos de medida españoles que participaron.

Las tablas y gráficos que aparecen en este documento se han confeccionado para este artículo, resumiendo los resultados disponibles en los diferentes informes del proyecto FILTER [1 a 5]. Con ello se ha tratado de sintetizar la información, obteniendo unas conclusiones generales sobre as-

pectos tales como la precisión de los perfiles longitudinales y su repetibilidad, o la influencia de diferentes factores en la obtención de los índices de regularidad longitudinal. Además, se incluyen algunas correlaciones entre el IRI y los diferentes índices de regularidad longitudinal que se obtuvieron en el experimento

### Participación española en el proyecto FILTER

El proyecto FILTER se dividió en varias tareas, de las cuales ha habido participación española en las siguientes:

- **Inventario de los equipos de medida de la regularidad longitudinal y transversal.** En este inventario están incluidos datos de 5 equipos españoles.
- **Experimento FILTER.** En el experimento, que tuvo lugar en Alemania y los Países Bajos, participaron 4 equipos españoles.
- **Participación en el grupo de trabajo que llevó a cabo el proyecto.** El Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX ha formado parte de este grupo.

Para alcanzar el objetivo principal del proyecto, era necesario determinar, en primer lugar, qué equipos son los que se utilizan en Europa para medir la regularidad superficial de los firmes, y cuáles son sus características principales. Por ello, la primera tarea del proyecto consistió en hacer un inventario de estos equipos de

medida de alta velocidad de regularidad longitudinal y transversal. Este documento fue publicado en enero de 1999 por el FEHRL [1].

Para obtener la información, en 1998 se envió un cuestionario a 120 direcciones distribuidas en 25 países europeos, incluida Rusia. En otras publicaciones [1, 5, 10] es posible encontrar unos cuadros resumen con las características de los equipos que contestaron a las encuestas.

En lo que se refiere a las contestaciones por parte de España, se recibió información de un total de 5 equipos (tabla 1). De ellos 3 miden la regularidad longitudinal y transversal y 2 exclusivamente la regularidad longitudinal.

En la tabla 2 aparece el resumen de algunas de las características de los equipos de medida de regularidad longitudinal.

En el experimento, que se celebró en Alemania y los Países Bajos [2], y que se describe en el artículo publicado en la revista RUTAS [10], participaron 4 de los 5 equipos españoles que contestaron a la encuesta (tabla 1), concretamente, los dos perfilómetros Greenwood y los dos RST. Todos ellos proporcionaron perfiles e índices de regularidad longitudinal. Por tanto, sus resultados forman parte del análisis y conclusiones que se mencionan en este artículo.

Es importante recordar que los equipos debían tomar medidas a 60 km/h, a 90 km/h y a la velocidad óptima de cada equipo; y debían realizar 3 pasadas a cada una de las velocidades. El total de tramos de ensayo fue de 12, de los cuales 5 (los correspondientes a la pista de ensayo de la DAF) tenían 400 m de longitud; y el resto, 500 m de longitud.

### Perfiles longitudinales

Los equipos que proporcionaron perfiles longitudinales fueron un total de 21 (tabla 3).



**Tabla 2: Características de los equipos de medida de regularidad longitudinal de los equipos españoles incluidos en el inventario**

Equipo	Principio de medida	Velocidad (km/h)	Frecuencia de respuesta	Ancho banda	Resol. vertical (mm)	Resol. horizontal (mm)	Intervalo (mm)
Greenwood CEDEX	Triangulación sobre un plano de referencia	30-130	Plana entre $\pm 3$ dB desde 0,2 Hz a 2 kHz	0,01-100 m a 72 km/h	0,05	3	3-6
Greenwood ELSAMEX	Triangulación sobre un plano de referencia	5-130	Plana entre $\pm 3$ dB desde 0,2 Hz a 2 kHz	0,01-100 m a 72 km/h	0,05	3	3-6
Laser Portable RST PT2	Pendientes obtenidas de la distancia y el tiempo	8-90		0,1-100 m	0,1	~ 1	50 ó 100
Video Laser RSTII	Pendientes obtenidas de la distancia y el tiempo	8-90		0,1-100 m	0,1	~ 1	50 ó 100
KILAW T6500	Plano de referencia independiente del movimiento del vehículo *	16-110	Plana entre $\pm 3$ dB desde 0 Hz a 256 Hz	0-100 m a 16-100 km/h	0,025 mm estático, 0,25 m dinámico	3	25

Las tablas y conclusiones que aparecen en este apartado se han elaborado a partir de otras más detalladas, que se pueden encontrar en el informe sobre las medidas de regularidad longitudinal obtenidas en el experimento y en el CD contenido en el informe final del FILTER [3, 5]. En este artículo se realiza un análisis de los resultados en general. Para conocer los de cada uno de los equipos o consultar una información más detallada, es necesario acudir a estos documentos.

El método de análisis de los perfiles longitudinales se explica de forma más detallada en el artículo de RUTAS nº 85 [10] y en los informes del proyecto FILTER [3, 5]. Se han obtenido resultados sobre la precisión de los perfiles de cada participante comparados con los de referencia, y sobre la repetibilidad de los perfiles proporcionados por cada participante. Estos resultados se resumen a continuación.

**Tabla 3: Equipos que proporcionaron perfiles longitudinales**

CÓDIGO	MODELO	PAÍS
A01	APL	Bélgica
A02	APL	Bélgica
B06	ARAN	Países Bajos
B07	ARAN	Países Bajos
B09	ARAN	Bélgica
B10	ROADMASTER	Finlandia
C11	DYNATEST 5051 RSP	Dinamarca
C12	ALFRED	Noruega
C13	DRI PROFILOGRAPH III	Dinamarca
C15	RST	Suecia
D16	RST	España
D17	Perfilógrafo Greenwood	España
D18	RST	España
D19	Perfilógrafo Greenwood	España
E22	HRM	Alemania
E23	ARGUS	Alemania
F27	MRM	Reino Unido
F29	HRM	Reino Unido
F30	HARRIS	Reino Unido
G32		Rusia
G33	ZAG-VP	Eslovenia



### Precisión de los perfiles longitudinales de cada participante con respecto a los de referencia

Para evaluar esta precisión, se realizaron tres tipos de análisis:

- **Resultados basados en el análisis de la "energía".** En este estudio se ha definido como **energía la suma de los cuadrados de las alturas del perfil.**

- **Resultados basados en el histograma acumulado de las diferencias entre los perfiles de los equipos y los de referencia.**

- **Resultados de la función de transferencia de cada equipo y la del de referencia.** Se ha utilizado la norma ISO 8608 "Vibraciones mecánicas, perfiles superficiales de carreteras y presentación de los resultados de las mediciones".

Para realizar estos análisis, de las tres velocidades a que debían medir los participantes, se ha seleccionado la velocidad óptima proporcionada por cada equipo con objeto de obtener los resultados más realistas posibles.

Es conveniente recordar que los perfiles se dividieron en 3, con objeto de analizar separadamente las longitudes de onda cortas, medias y largas [10]. Los intervalos correspondientes a cada caso son:

- **Longitudes de onda corta:** 0,78125 m – 3,125 m

- **Longitudes de onda media:** 3,125 m – 12,5 m

- **Longitudes de onda larga:** 12,5 m – 50,0 m

Los resultados detallados se pueden encontrar en el informe del proyecto sobre medidas longitudinales del experimento [3], en el que se indica que, como regla general, parece que los equipos están pensados fundamentalmente para obtener índices de regularidad longitudinal precisos, más que para determinar perfiles con la misma precisión. No obstante, el análisis de las funciones de transferencia, como se indica más adelante, parece demostrar que no ha-

bria grandes obstáculos para obtener perfiles más precisos.

### Resultados basados en el análisis de la energía

Los resultados se han obtenido a partir de las 3 pasadas a velocidad óptima, para cada tramo y cada participante. Además, cada uno de estos tramos se dividió en subtramos [3].

Se obtuvo el cociente de la energía de los perfiles proporcionados por cada participante y la energía de los perfiles de referencia. Por tanto, el mejor resultado es aquel en que el cociente está más próximo a 1. En el caso de ser mayor que 1, la energía correspondiente al perfil del participante es mayor que la del perfil de referencia. Si es menor que 1, ocurre lo contrario.

Para el análisis se eligieron:

- **Resultados óptimos,** los que tienen el cociente incluido en el intervalo [0,8 – 1,25].

- **Resultados extremos,** los que tienen cocientes mayores que 2,5 y menores que 0,4.

Estos resultados se obtienen para cada una de las longitudes de onda (cortas, medias y largas).

Una vez hecho esto, se obtuvieron los resultados del "mejor caso o mejor pasada" y del "peor caso o peor pasada".

- Se entiende como "mejor caso" los resultados correspondientes a la mejor pasada de las tres que dio cada participante (tabla 4). Es decir, la que proporcionaba el cociente más cercano a 1.

- Se entiende como "peor caso", los resultados correspondientes a la peor de las 3 pasadas (tabla 4).

De esta forma, se puede adquirir una visión general de las posibles oscilaciones en la precisión de los equipos para obtener perfiles longitudinales, utilizando como método de análisis la energía (definida como ya se ha mencionado).

Es conveniente tener en cuenta que no se han considerado las pasadas por separado en cada tramo, sino conjuntamente. Es de-

cir, el experimento se llevó a cabo en la pista de la DAF (tramos "O, P, Q, R y S") y en carretera (tramos "U, V, W, X, Y y Z"). Se ha considerado mejor pasada la que proporciona mejores resultados en conjunto de cada grupo de tramos, y peor pasada la que proporciona los peores cocientes en conjunto para cada grupo de tramos. Es importante tener en cuenta este aspecto, porque explica la razón por la que en la tabla 4 hay tramos individuales para los que la mejor pasada ofrece peores resultados que la peor pasada.

En la tabla 4 aparece el porcentaje de los equipos que, para cada tramo de ensayo, obtuvieron resultados (cocientes de energía) incluidos dentro de los valores óptimos y de los valores extremos. Por tanto, no está incluido el porcentaje de participantes que, para cada tramo, obtuvieron unos cocientes intermedios. En la tabla se diferencian la mejor y la peor pasada de los equipos para cada longitud de onda.

Del análisis de los resultados de cada participante [3, 5], cuyos datos individuales no aparecen en este artículo, se concluye que existen diferencias en el comportamiento de cada equipo al proporcionar los perfiles de las tres categorías de longitudes de onda. Algunos de ellos son más precisos para longitudes de onda corta, mientras que otros lo son para longitudes de onda largas. En general, todos son bastante precisos en el rango de las longitudes de onda medias.

Si se analiza el resumen que aparece en la tabla 4, se observa que para las longitudes de onda medias los porcentajes de equipos que obtuvieron valores óptimos son los más elevados (tanto en los resultados correspondientes a la mejor como a la peor pasada). Además, en este caso, el porcentaje de equipos que obtuvieron valores extremos es el más pequeño.

Si se comparan los resultados medios de todos los tramos (última fila de la tabla 4), correspon-



**Tabla 4: Resumen por tramos de los resultados del análisis de energías: Porcentaje de equipos que obtuvieron cocientes de energía óptimos y extremos, en el mejor y peor caso y para cada longitud de onda**

Tramos	ONDAS CORTAS				ONDAS MEDIAS				ONDAS LARGAS			
	Mejor pasada		Peor pasada		Mejor pasada		Peor pasada		Mejor pasada		Peor pasada	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	valores óptimos	valores extremos	valores óptimos	valores extremos	valores óptimos	valores extremos	valores óptimos	valores extremos	valores óptimos	valores extremos	valores óptimos	valores extremos
O	80,95	0,00	61,90	4,76	76,19	0,00	57,14	4,76	71,43	9,52	52,38	19,05
P	80,95	0,00	57,14	4,76	100,00	0,00	66,67	4,76	57,14	9,52	47,62	14,29
Q	85,71	0,00	76,19	4,76	95,24	0,00	90,48	4,76	71,43	9,52	47,62	14,29
R	76,19	0,00	57,14	4,76	100,00	0,00	80,95	4,76	85,71	0,00	80,95	9,52
S	42,86	0,00	19,05	4,76	80,95	0,00	85,71	0,00	71,43	4,76	61,90	9,52
U	47,62	19,05	23,81	28,57	71,43	0,00	52,38	4,76	71,43	4,76	52,38	9,52
V	71,43	0,00	38,09	0,00	76,19	0,00	71,43	0,00	85,71	0,00	66,67	0,00
W	71,43	0,00	42,86	4,76	85,71	0,00	85,71	0,00	90,48	0,00	66,67	9,52
X	76,19	0,00	71,43	4,76	90,48	0,00	90,48	0,00	90,48	0,00	71,43	0,00
Y	38,10	0,00	28,57	0,00	95,24	0,00	90,48	0,00	85,71	4,76	61,90	4,76
Z	57,14	4,76	42,86	4,76	19,05	0,00	23,81	0,00	47,62	4,76	42,86	9,52
MEDIA	66,23	2,16	47,18	6,06	80,95	0,00	72,29	2,16	65,37	4,33	54,55	9,09

Siendo:

Valores óptimos: Cocientes contenidos en el intervalo [0,8 - 1,25].

Valores extremos: Cocientes mayores de 2,5 o menores de 0,4.

Tramos O, P, Q, R y S correspondientes a la pista de ensayo de la DAF [2, 10], con mayores valores de IRI.

Tramos U, V, W, X, Y y Z correspondientes a carretera [2, 10], con menores valores de IRI.

dientes a las longitudes de onda cortas y largas, se aprecia que no hay mucha diferencia entre ellas, aunque el porcentaje de valores extremos es ligeramente superior para las longitudes de onda largas.

Los resultados de la tabla 4 parecen corroborar lo ya mencionado sobre la existencia de unos equipos más precisos para las longitudes de onda cortas y otros más precisos para las longitudes de onda largas. Este factor puede condicionar la precisión de los índices de regularidad longitudinal, a no ser que los filtros que se apliquen para obtenerlos amortigüen este hecho.

Si se analizan los porcentajes óptimos y extremos correspondientes a cada tramo por separado, se aprecia que, para longitudes de onda cortas, hay un mayor número de casos en que menos del 50% de los equipos obtuvieron valores óptimos.

En las figuras 1 y 2 se aprecia de forma más gráfica los resultados de la tabla 4 por tramos de ensayo. La figura 1 contiene el porcentaje de equipos que obtu-

vieron cocientes extremos para cada sección, cada longitud de onda y para la mejor y peor pasada. Se aprecia que, como es lógico, el porcentaje es mayor para el caso de la peor pasada. De cualquier forma, estos valores no alcanzan en ningún caso el 30% de los equipos. Se observa que los peores resultados corresponden al tramo "U" localizado en carretera y con un IRI no muy elevado.

La figura 2 muestra el porcentaje de equipos que obtuvieron cocientes óptimos para cada sección, cada longitud de onda y para la mejor y peor pasada. Se aprecia que los peores resultados corresponden a los tramos "U, V, Y y Z", de nuevo, todos ellos localizados en carretera y en el tramo "S" correspondiente a la pista de ensayo de la DAF, todos ellos con valores de IRI no muy elevados.



Figura 1: Porcentaje de equipos con cocientes extremos por tramos



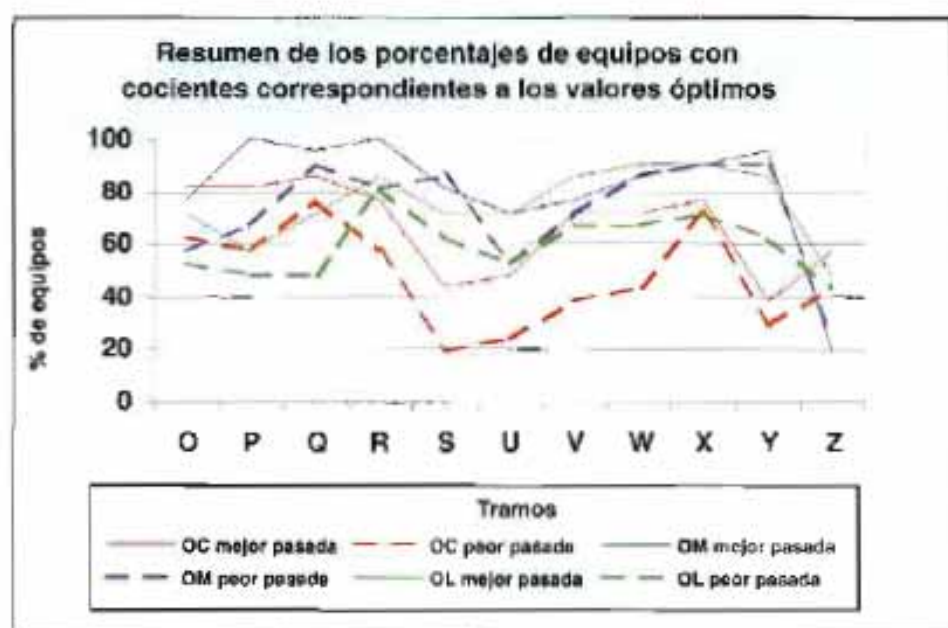


Figura 2: Porcentaje de equipos con cocientes óptimos por tramos.

Hay que tener en cuenta que:

- Los tramos correspondientes a la pista de ensayo eran mucho más irregulares, con valores de IRI que no son usuales en carretera y, sin embargo, los resultados obtenidos son del mismo orden que otros con irregularidad menor.

- Las proporciones de los equipos que han obtenido valores óptimos son, en general y salvo excepciones en algunas secciones, superiores al 50%.

De ahí, se podría concluir que el valor de la irregularidad total de los tramos no ha influido en la precisión de los perfiles. Sin embargo, si parece que algunos tramos tienen unas características que pueden influir en los perfiles proporcionados por la generalidad de los equipos. Por tanto, sería necesario seguir investigando al respecto, analizando cada caso con más detalle y separando los resultados de los participantes.

*Resultados basados en el histograma de las diferencias de altura entre el perfil de referencia y el proporcionado por los equipos*

El siguiente paso en el análisis de la precisión de los perfiles longitudinales fue confeccionar unos histogramas en los que aparecen,

en abscisas, las diferencias de altura entre el perfil de referencia y el obtenido por los equipos; y en ordenadas los porcentajes de medidas incluidas en cada diferencia. Con la representación gráfica [5] se cuenta con un medio visual para evaluar la capacidad de los equipos para reproducir los perfiles de referencia.

Una vez confeccionados los histogramas, se calculó el porcentaje de puntos del perfil cuya diferencia con respecto al de referencia está contenido en varios intervalos. Los intervalos varían con cada rango de longitud de onda (corta, media y larga). Se realizaron los análisis correspondientes a tres intervalos por cada rango de longitud de onda. Todos los intervalos están centrados en el 0 y tienen diferente longitud, de forma que el intervalo más grande corresponde al límite total; el segundo está contenido dentro de él; y el tercero, dentro de los otros dos. Los límites elegidos son:

- Longitudes de onda corta: Diferencias entre el perfil del participante y de referencia contenidas en:

- o  $\pm 0,6$  mm
- o  $\pm 0,4$  mm
- o  $\pm 0,2$  mm

- Longitudes de onda media:

Diferencias entre el perfil del participante y de referencia contenidas en:

- o  $\pm 1,5$  mm
- o  $\pm 1,0$  mm
- o  $\pm 0,5$  mm

- Longitudes de onda larga:

Diferencias entre el perfil del participante y de referencia contenidas en:

- o  $\pm 3,0$  mm
- o  $\pm 2,0$  mm
- o  $\pm 1,0$  mm

Para este artículo se ha confeccionado la tabla 5, en la que se analizan los resultados correspondientes a la mejor de las tres pasadas proporcionadas por cada participante. En la tabla aparece el porcentaje de equipos que han proporcionado valores óptimos para cada uno de los intervalos fijados. En este caso se ha fijado como **valor óptimo** aquel en que más del 80% de las medidas del perfil está contenido en ese intervalo.

La determinación de la proporción de equipos que tienen un 80% o más de sus diferencias contenidas en un intervalo proporciona información acerca de cuál es la precisión que, como media, se puede esperar de los equipos participantes. Un alto porcentaje en los intervalos más pequeños indicará una mayor precisión. Si se analiza la tabla 5, se observa que en ningún caso se puede esperar una precisión correspondiente al intervalo más pequeño fijado para cada rango de longitud de onda. En lo que se refiere a los intervalos intermedios fijados para cada rango de longitud de onda, más del 50% de los equipos se encuadran dentro de esa precisión, excepto en las ondas cortas. Como es lógico, los mayores porcentajes corresponden con los intervalos más grandes. Pero se aprecia una notable diferencia entre los resultados correspondientes a ondas medias y largas, con respecto a los resultados correspondientes a ondas cortas.

En la tabla 6 aparecen los porcentajes de equipos que tie-



**Tabla 5: Porcentaje de equipos que en su mejor pasada a velocidad óptima tienen al menos el 80% de sus diferencias con los puntos del perfil de referencia, contenidos en los intervalos fijados para cada rango de longitud de onda.**

	ONDAS CORTAS			ONDAS MEDIAS			ONDAS LARGAS		
Tramos	Intervalo $\pm 0,6$ mm	Intervalo $\pm 0,4$ mm	Intervalo $\pm 0,2$ mm	Intervalo $\pm 1,5$ mm	Intervalo $\pm 1,0$ mm	Intervalo $\pm 0,5$ mm	Intervalo $\pm 3,0$ mm	Intervalo $\pm 2,0$ mm	Intervalo $\pm 1,0$ mm
O	0,00	0,00	0,00	66,67	9,52	0,00	61,90	23,81	0,00
P	38,10	0,00	0,00	95,24	71,43	0,00	85,71	47,62	0,00
Q	9,52	0,00	0,00	85,71	33,33	0,00	71,43	52,38	0,00
R	4,76	0,00	0,00	33,33	0,00	0,00	33,33	19,05	0,00
S	100,00	38,10	0,00	100,00	100,00	0,00	95,24	95,24	0,00
U	66,67	9,52	0,00	100,00	90,48	0,00	95,24	61,90	0,00
V	90,48	28,57	0,00	95,24	90,48	0,00	76,19	52,38	0,00
W	80,95	14,29	0,00	90,48	90,48	0,00	80,95	57,14	0,00
X	76,19	0,00	0,00	95,24	76,19	0,00	95,24	66,67	0,00
Y	100,00	47,62	0,00	100,00	100,00	0,00	100,00	90,48	0,00
Z	100,00	57,14	0,00	100,00	100,00	0,00	100,00	85,71	0,00
<b>MEDIA</b>	<b>60,61</b>	<b>17,74</b>	<b>0,00</b>	<b>87,45</b>	<b>69,26</b>	<b>0,00</b>	<b>81,38</b>	<b>59,31</b>	<b>0,00</b>

nen menos del 20% de sus diferencias con el perfil de referencia comprendidas en los diferentes intervalos. Por tanto, cuanto menor sea este porcentaje, habrá un mayor número de diferencias contenida en los intervalos. Por ejemplo, un porcentaje de 100 en el intervalo más pequeño correspondiente a un rango de longitud de onda indica que más del 80% de las diferencias están contenidas en los demás intervalos. Por consiguiente, un bajo porcentaje en los intervalos

más pequeños, indicará una mayor precisión.

Como era de esperar, los porcentajes más elevados corresponden a los intervalos más pequeños de cada rango de longitud de onda. No obstante, salvo el caso de ondas cortas (35,06%), estos valores no alcanzan el 12%. De nuevo parece que la precisión obtenida utilizando los histogramas ha sido menor para longitudes de onda cortas.

Si se analizan conjuntamente las tablas 5 y 6, el lector podrá

adquirir una información general de la distribución de las diferencias en las medidas del perfil proporcionado por los equipos y el perfil de referencia.

También en este caso se observan diferencias apreciables entre los resultados de los tramos que parecen debidas a características del perfil más que a características de los equipos. Esta afirmación se aprecia mejor en las figuras 3 y 4, en las que se observa que los peores resultados son los correspondientes a los tramos "O"

**Tabla 6: Porcentaje de equipos que en su mejor pasada a velocidad óptima tienen el 20% como máximo, de sus diferencias con los puntos del perfil de referencia, contenidos en los intervalos fijados para cada rango de longitud de onda.**

	ONDAS CORTAS			ONDAS MEDIAS			ONDAS LARGAS		
Tramos	Intervalo $\pm 0,6$ mm	Intervalo $\pm 0,4$ mm	Intervalo $\pm 0,2$ mm	Intervalo $\pm 1,5$ mm	Intervalo $\pm 1,0$ mm	Intervalo $\pm 0,5$ mm	Intervalo $\pm 3,0$ mm	Intervalo $\pm 2,0$ mm	Intervalo $\pm 1,0$ mm
O	0,00	4,76	100,00	0,00	0,00	19,05	0,00	0,00	23,81
P	0,00	0,00	33,33	0,00	0,00	9,52	0,00	0,00	4,76
Q	0,00	0,00	85,71	0,00	0,00	9,52	0,00	0,00	14,29
R	0,00	0,00	95,24	4,76	4,76	66,67	0,00	4,76	57,14
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
U	0,00	0,00	33,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V	0,00	0,00	9,52	0,00	0,00	4,76	0,00	0,00	9,52
W	0,00	0,00	9,52	0,00	0,00	9,52	0,00	0,00	14,29
X	0,00	0,00	19,05	0,00	0,00	4,76	0,00	0,00	4,76
Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Z	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MEDIA</b>	<b>0,00</b>	<b>0,43</b>	<b>35,06</b>	<b>0,43</b>	<b>0,43</b>	<b>11,25</b>	<b>0,00</b>	<b>0,43</b>	<b>11,69</b>



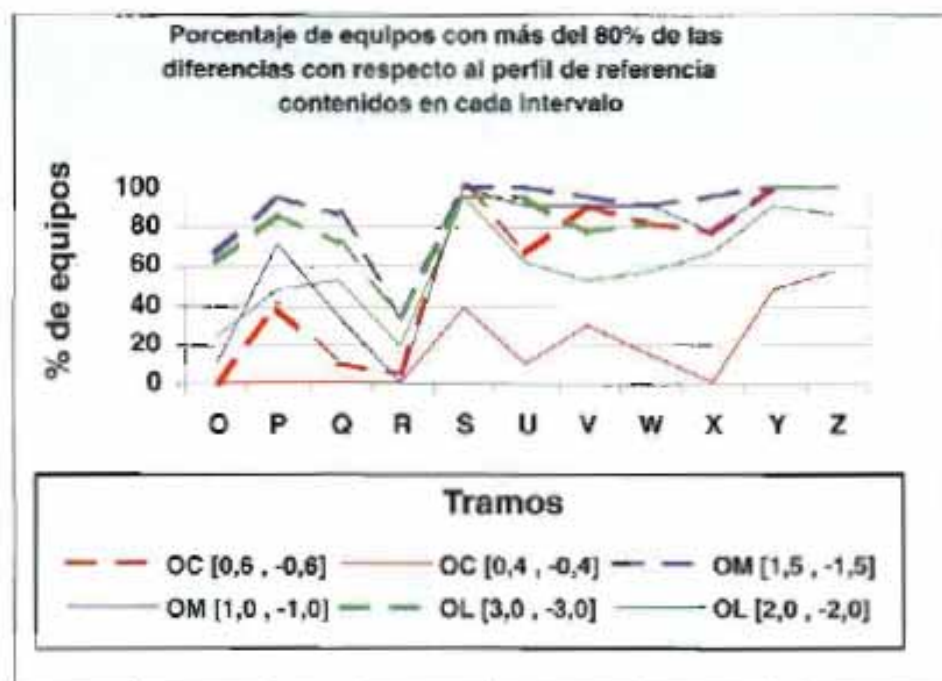


Figura 3: Porcentaje de equipos con valores óptimos en el análisis de los histogramas, por tramos.

y "R". Dado que los resultados son peores para todos los equipos en algunos tramos, parece que la explicación no se debe buscar en los participantes sino en los propios tramos.

#### Resultados de la función de transferencia

La utilidad de las funciones de transferencia en este análisis es la de determinar la capacidad que, en general, tienen los equipos pa-

ra proporcionar una buena aproximación de un perfil de carretera. En este caso, el análisis se ha hecho teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la Norma ISO 8608, tanto para los perfiles de referencia como para los proporcionados por los participantes en el experimento FILTER. También se han tenido en cuenta el número de pasadas que se han utilizado para obtener los perfiles de los equipos, porque este número

de pasadas puede explicar las diferencias en los resultados entre unos equipos y otros.

Los resultados obtenidos por cada equipo se pueden encontrar en los informes del Proyecto FILTER [3, 5]. Como conclusión general, los informes indican que las funciones de transferencia analizadas son buenas y consistentes con las especificaciones de los fabricantes. Se concluye también que ha sido sorprendente que los resultados relativos a las funciones de transferencia hayan sido mejores que los esperables analizando los histogramas.

#### Repetibilidad de los perfiles longitudinales

Debido a que para cada perfil existían como máximo tres pasadas, utilizar técnicas estadísticas como medias y desviaciones típicas no parecía suficientemente fiable. Por ello, el método de análisis se ha basado en los resultados obtenidos a partir de las diferencias de energía y de los histogramas correspondientes a las diferentes pasadas.

#### Resultados basados en la energía

En este caso, para cada participante se han analizado cada pareja de pasadas (3 combinaciones posibles como máximo). Posteriormente se han utilizado las dos pasadas para las cuales la diferencia en valor absoluto de las energías era mayor. De esta forma se analiza el peor caso de los posibles. Se ha dado el caso de equipos cuya repetibilidad ha sido muy buena en ciertos tramos y estas diferencias han sido iguales a 0.

En los informes [3, 5] se describe el indicador utilizado en este caso, que es el porcentaje obtenido al dividir la mayor diferencia de energías entre la energía del perfil de referencia. Por tanto, siempre da valores positivos y, cuanto más cercanos a 0, mejor habrá sido la repetibilidad del equipo. Por ello se ha confeccionado la tabla 7, en la que se han cal-

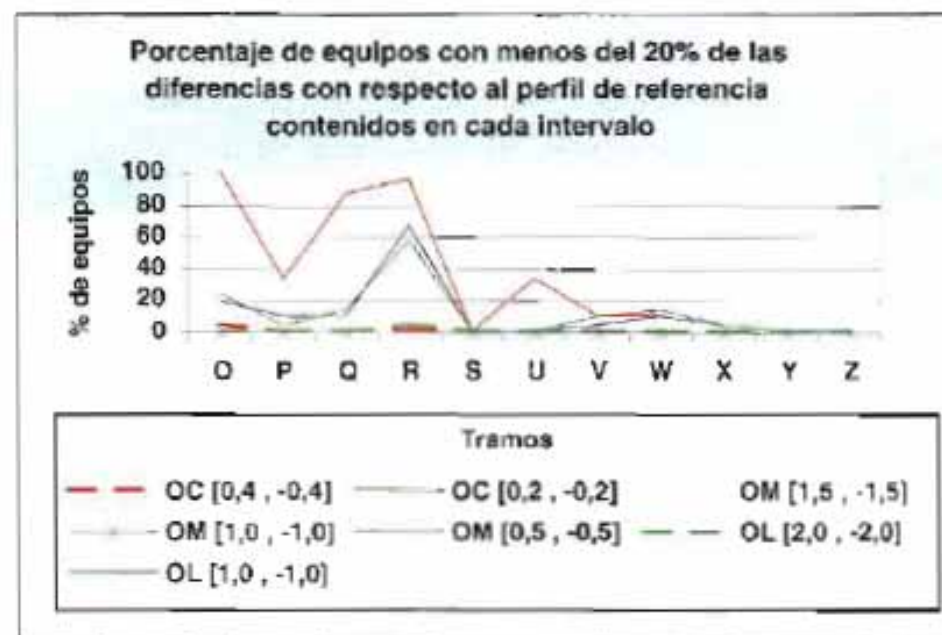


Figura 4: Porcentaje de equipos con valores extremos en el análisis de los histogramas, por tramos.



**Tabla 7: Porcentaje de equipos cuya diferencia de energías expresada como porcentaje de la energía de referencia está comprendida en los diferentes intervalos**

Tramos	ONDAS CORTAS						ONDAS MEDIAS						ONDAS LARGAS					
	0-10	11-25	26-50	51-75	76-100	>100	0-10	11-25	26-50	51-75	76-100	>100	0-10	11-25	26-50	51-75	76-100	>100
O	82,38	38,33	4,76	0,00	0,00	9,52	80,95	4,76	4,76	0,00	4,76	4,76	47,62	23,81	9,52	0,00	4,76	14,29
P	80,95	9,52	4,76	0,00	0,00	4,76	80,95	14,29	0,00	0,00	0,00	4,76	57,14	19,05	4,76	0,00	9,52	0,62
Q	85,71	9,52	0,00	0,00	0,00	4,76	95,24	0,00	0,00	0,00	0,00	4,76	76,19	9,52	4,76	4,76	0,00	1,76
R	82,38	38,10	4,76	0,00	4,76	0,00	80,95	14,29	0,00	0,00	0,00	4,76	80,95	9,52	0,00	0,00	0,00	9,52
S	23,81	42,86	19,05	9,52	0,00	4,76	85,71	9,52	4,76	0,00	0,00	0,00	57,14	19,05	9,52	4,76	0,00	9,52
U	23,81	23,81	33,33	14,29	0,00	4,76	42,86	42,86	4,76	4,76	4,76	0,00	47,62	33,33	14,29	0,00	0,00	4,76
V	52,38	19,05	19,05	4,76	0,00	4,76	85,71	14,29	0,00	0,00	0,00	0,00	85,71	14,29	0,00	0,00	0,00	0,00
W	38,10	47,62	9,52	0,00	9,76	0,00	85,71	14,29	0,00	0,00	0,00	0,00	52,38	33,33	9,52	0,00	0,00	4,76
X	66,67	14,29	14,29	0,00	0,00	4,76	66,67	33,33	0,00	0,00	0,00	0,00	47,62	47,62	4,76	0,00	0,00	0,00
Y	38,10	38,10	19,05	0,00	0,00	4,76	71,43	19,05	9,52	0,00	0,00	0,00	66,67	14,29	9,52	9,52	0,00	0,00
Z	42,86	10,05	14,29	9,52	9,52	4,76	80,95	14,29	4,76	0,00	0,00	0,00	66,67	19,05	14,29	0,00	0,00	0,00
MEDIA	50,65	28,57	12,99	3,5	1,70	4,30	77,92	16,45	2,60	0,43	0,86	1,73	62,34	20,78	7,36	1,73	1,30	5,19

culado los porcentajes de equipos cuyos indicadores de repetibilidad están contenidos en intervalos diferentes.

Como puede verse, la repetibilidad es mayor para las ondas medias. Este resultado era esperable, si se tiene en cuenta que la precisión obtenida por los equipos es también mejor para este rango de longitudes de onda. Para las longitudes de onda media, los porcentajes de los equipos con indicadores contenidos en los intervalos más pequeños son los más elevados. En lo que se refiere a las longitudes de onda cortas y largas, las diferencias no son muy apreciables.

De nuevo, se aprecia una variación en la repetibilidad co-

respondiente a los diferentes tramos.

*Resultados basados en los histogramas*

Recordando el análisis por histogramas, para cada pasada se tiene el porcentaje de valores para los que las diferencias entre los puntos del perfil del participante y el de referencia están contenidas en determinados intervalos. Para analizar la repetibilidad del equipo, se han tomado las dos pasadas para las que es mayor la diferencia en valor absoluto de los porcentajes.

En la tabla 8 aparece un resumen de los resultados obtenidos por tramos. Se ha calculado el porcentaje de equipos para los que las diferen-

cias entre sus dos pasadas están contenidas en diferentes intervalos. En este caso, no son comparables los resultados correspondientes a ondas cortas con los de las ondas medias y largas, ya que el intervalo  $\pm 0,6$  mm es el máximo correspondiente a esta longitud de onda (análisis de precisión utilizando histogramas), mientras que para las ondas medias y largas se han seleccionado los intervalos intermedios.

### Índices de regularidad longitudinal

Como se menciona en el artículo anterior de RUTAS [10], los equipos proporcionaron un total de 29 índices de regulari-

**Tabla 8: Porcentaje de equipos cuya diferencia de porcentajes obtenidos en los histogramas está contenida en los diferentes intervalos que aparecen en esta tabla**

Tramos	ONDAS CORTAS.						ONDAS MEDIAS						ONDAS LARGAS					
	Diferencias entre $\pm 0,6$ mm						Diferencias entre $\pm 1,0$ mm						Diferencias entre $\pm 2,0$ mm					
	0-10	11-25	26-50	51-75	76-100	>100	0-10	11-25	26-50	51-75	76-100	>100	0-10	11-25	26-50	51-75	76-100	>100
O	76,19	23,81	0,00	0,00	0,00	0,00	76,19	14,29	9,52	0,00	0,00	0,00	85,71	9,52	0,00	4,76	0,00	0,00
P	90,48	9,52	0,00	0,00	0,00	0,00	80,95	14,29	4,76	0,00	0,00	0,00	80,95	14,29	0,00	4,76	0,00	0,00
Q	95,24	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	85,71	9,52	4,76	0,00	0,00	0,00	80,95	14,29	0,00	4,76	0,00	0,00
R	85,71	9,52	4,76	0,00	0,00	0,00	85,71	4,76	9,52	0,00	0,00	0,00	85,71	9,52	0,00	4,76	0,00	0,00
S	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,24	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	85,71	9,52	4,76	0,00	0,00	0,00
U	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,24	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00
V	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,24	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
W	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,24	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	90,48	9,52	0,00	0,00	0,00	0,00
X	95,24	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	95,24	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	80,95	14,29	4,76	0,00	0,00	0,00
Y	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,24	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	90,48	4,76	4,76	0,00	0,00	0,00
Z	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MEDIA	94,81	4,76	0,43	0,00	0,00	0,00	91,34	6,06	2,60	0,00	0,00	0,00	88,75	8,22	1,30	1,73	0,00	0,00



Tabla 9: Índices de regularidad longitudinal

ÍNDICE		ABREVIATURA
A:	IRI (Índice de Regularidad Internacional)	IRI
C:	Varianza de 3 m como se utiliza en el Reino Unido	V3
D:	Varianza de 10 m como se utiliza en el Reino Unido	V10
E:	Varianza de 30 m como se utiliza en el Reino Unido	V30
F:	G <sub>1</sub> (m) y w como se define en la norma ISO 8608	ISO
G:	Coefficiente CP (Coefficient de Planéité) 2,5 como se utiliza en Bélgica	CP2,5
H:	Coefficiente CP (Coefficient de Planéité) 10 como se utiliza en Bélgica	CP10
I:	Coefficiente CP (Coefficient de Planéité) 40 como se utiliza en Bélgica	CP40
J:	NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda cortas	NBOC
K:	NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda medias	NBOM
L:	NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda largas	NBOL
M:	Regla de 5 m	R5m
N:	RN (Ride Number)	RN
P:	AUN como se utiliza en Alemania	AUN
Q:	Desviación estándar de 3 m, media móvil	DS3
R:	Desviación estándar de 10 m, media móvil	DS10
S:	Desviación estándar de 30 m, media móvil	DS30
T:	Altura de irregularidad periódica	AIP
W:	Energía de longitud de onda corta como se utiliza en Francia	EOC
X:	Energía de longitud de onda media como se utiliza en Francia	EOM
Y:	Energía de longitud de onda larga como se utiliza en Francia	EOL
Z:	Desviación de la regla de 3 m como se utiliza en Rusia	DR3m
1:	RMS (Root Mean Square) para bandas de onda de 0,5 - 2,5 m	RMSC
2:	RMS (Root Mean Square) para bandas de onda de 2,5 - 10 m	RMSM
3:	RMS (Root Mean Square) para bandas de onda de 10 - 50 m	RMSL
4:	Varianza de la pendiente	VP
5:	NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda cortas como se utiliza en Francia	NBO'C
6:	NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda medias como se utiliza en Francia	NBO'M
7:	NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda largas como se utiliza en Francia	NBO'L

dad longitudinal, que aparecen en la tabla 9. Los índices se calcularon para cada velocidad, cada pasada, cada sección y sobre longitudes de 50, 100, 200, 400 y 500 m.

Los equipos proporcionaron diferentes tipos de índices (tabla 10). Aunque en total el número de índices es elevado, se aprecia que la mayoría de ellos calcularon el IRI, lo que indica que parece que cumple su función de indicador internacional. El resto de los índices los proporcionaron 4 equipos como máximo.

Los pasos seguidos para el analizar todos estos resultados han sido:

- Comparación entre los datos proporcionados por cada participante (en cada índice, velocidad

e intervalo de resultados) y la media de todos los equipos.

- Análisis de la influencia de la velocidad en los datos.

- Correlaciones entre índices.

- Análisis de la repetibilidad y reproducibilidad de los índices.

A continuación se describen los resultados principales y las conclusiones obtenidas del análisis:

#### Comparación entre los datos proporcionados por cada participante y la media de todos los equipos

El método seguido para el análisis se explica con más detalle en el artículo de la revista RUTAS nº 85 [10]. Este método consistió en hallar la media de los índices correspondientes a diferentes pasadas. De esta forma, se tenía un valor para cada participante, ca-

da índice, cada tramo, cada velocidad y cada intervalo de resultados. Posteriormente se calculó la media de todos los equipos que proporcionaron el mismo índice, para cada índice, tramo, velocidad e intervalo de resultados. Finalmente se obtuvieron las regresiones lineales entre los valores de cada participante y la media de todos los que proporcionaron el mismo índice. De estas regresiones se determinó el valor de  $R^2$  y de la desviación típica. Por supuesto, este análisis ha sido posible solo en los casos en que más de un equipo proporcionó ese índice.

De esta forma se puede determinar la coincidencia de los mismos índices proporcionados por diferentes equipos en los mismos tramos, para los mismos in-



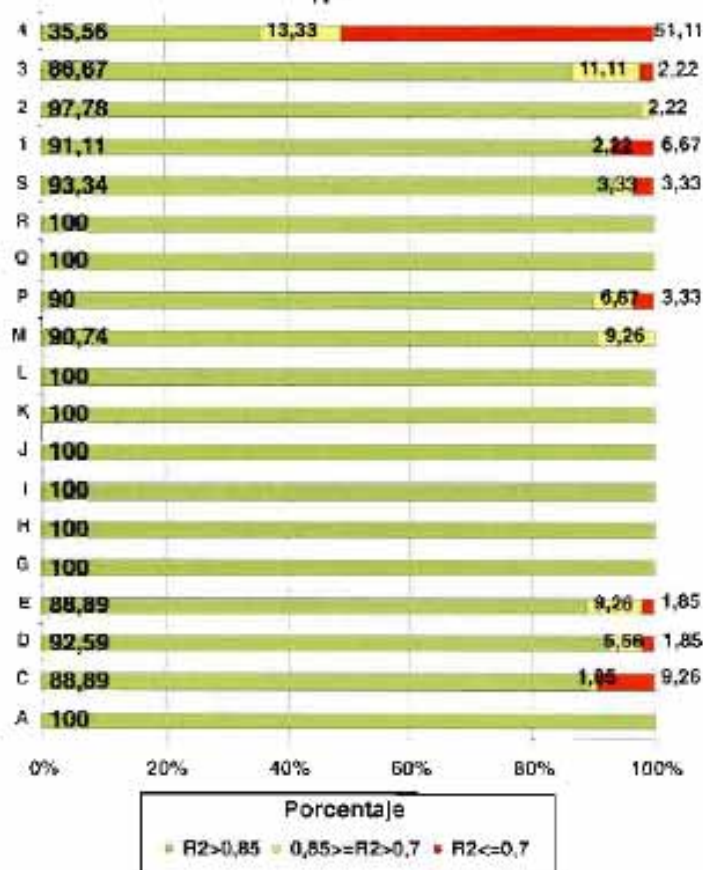
Tabla 10: Lista de equipos y de los índices que proporcionaron

EQUIPO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	1	2	3	4	5	6	7
ÍNDICE	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	1	2	3	4	5	6	7
A02	X						X	X	X	X	X													X	X	X					X	X	X
B06	X																																
B07	X																																
B09	X						X	X	X																								
B10	X																																
C11	X													X																			
C12	X																																
C13	X									X	X	X	X																	X			
C15	X																										X	X	X				
D16	X																										X	X	X	X			
D17	X									X	X	X	X																				
D18	X																										X	X	X	X			
D19	X									X	X	X	X																				
F22						X										X	X	X	X														
E23																X	X	X	X	X													
F27	X	X	X	X	X																												
F29	X	X	X	X	X																												
F30	X	X	X	X	X																												
G32																										X							
G33	X																																

tervalos de resultados y la misma velocidad. Podría decirse que es una forma poco usual de dar idea de la reproducibilidad de los datos dados por distintos equipos, sin utilizar la norma ISO 5725.

En la tabla 11 aparece el número total de regresiones lineales y el número de regresiones distribuidas según sus valores de  $R^2$ , una vez eliminados todos los valores aberrantes de los índices. En la figura 5 aparecen estos valores expresados en porcentajes.

Como se aprecia, los resultados de las correlaciones son, en general, bastante buenos, lo que parece indicar que los diferentes equipos han proporcionado valores de los mismos índices sensiblemente iguales. Partiendo de estos resultados positivos, se decidió utilizar las medias de los datos proporcionados por equipos diferentes para analizar la influencia de la velocidad y para obtener las correlaciones entre los índices de regularidad longitudinal.

Porcentajes de correlaciones según el valor de  $R^2$ Figura 5: Porcentaje de correlaciones comprendidas en diferentes intervalos de  $R^2$ .



**Tabla 11: Número de correlaciones según sus valores de  $R^2$ , para cada índice**

ABREV.	CÓDIGO	ÍNDICES	Nº DE CORRELACIONES			
			$R^2 > 0,85$	$0,85 \geq R^2 > 0,7$	$R^2 < 0,7$	TOTAL
IRI	A	IRI (Índice de Regularidad Internacional)	258	0	0	258
V3	C	Varianza de 3 m como se utiliza en el Reino Unido	48	1	5	54
V10	D	Varianza de 10 m como se utiliza en el Reino Unido	50	3	1	54
V30	E	Varianza de 30 m como se utiliza en el Reino Unido	48	5	1	54
CP2,5	G	Coef. CP (Coefficient de Planéité) 2,5 como se utiliza en Bélgica	6	0	0	6
CP10	H	Coef. CP (Coefficient de Planéité) 10 como se utiliza en Bélgica	6	0	0	6
CP40	I	Coef. CP (Coefficient de Planéité) 40 como se utiliza en Bélgica	6	0	0	6
NBOC	J	NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda cortas	54	0	0	54
NBOM	K	NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda medias	54	0	0	54
NBOL	L	NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda largas	54	0	0	54
R5m	M	Regla de 5 m	49	5	0	54
AUN	P	AUN como se utiliza en Alemania	27	2	1	30
DS3	Q	Desviación estándar de 3 m, media móvil	30	0	0	30
DS10	R	Desviación estándar de 10 m, media móvil	30	0	0	30
DS30	S	Desviación estándar de 30 m, media móvil	28	1	1	30
RMSC	1	RMS (Root Mean Square) para bandas de onda de 0,5 - 2,5 m	41	1	3	45
RMSM	2	RMS (Root Mean Square) para bandas de onda de 2,5 - 10 m	44	1	0	45
RMSL	3	RMS (Root Mean Square) para bandas de onda de 10 - 50 m	39	5	1	45
VP	4	Varianza de la pendiente	16	6	23	45
	<b>TOTAL</b>	<b>19 ÍNDICES</b>	<b>888</b>	<b>30</b>	<b>36</b>	<b>954</b>

### Análisis de la influencia de la velocidad en los datos

Para determinar si la velocidad había influido en la obtención de los índices, se utilizaron las medias de los índices proporcionados por todos los equipos para cada índice, velocidad, tramo e intervalo de resultados. Posteriormente se correlacionaron los resultados a la velocidad óptima (eje de ordenadas) con los resultados obtenidos a cada una de las otras dos velocidades (60 km/h y 90 km/h).

Para cada correlación se calcularon de nuevo los valores de  $R^2$  y el error estándar. El resultado fue que el 96,5% de las regresiones tenían un coeficiente de determinación mayor que 0,85 y unos errores bajos.

Como conclusión, se puede indicar que la velocidad no ha influido en los índices proporcionados por los equipos. Como consecuencia, para calcular las correlaciones entre los índices longitudinales, se utilizó la media de los valores a las tres velocidades.

### Correlaciones entre los índices longitudinales

El método seguido para determinar las correlaciones entre los índices de regularidad longitudinal es el que aparece, entre otros, en los artículos de las revistas RUTAS e Ingeniería Civil [10, 11]. Siguiendo este método se determinó, para cada intervalo de resultados, si existía o no correlación entre los diferentes índices, si la correlación era dudosa y si parecía que había correlación, pero se apreciaban valores que podían ser aberrantes.

El resultado sobre la existencia de correlaciones aparece en la tabla 12.

Como se ha indicado, se obtuvo una correlación para cada pareja de índices y cada intervalo de resultados. Para cada correlación se determinó el valor de  $R^2$ , el error estándar y el resultado del test de las rachas [3, 5, 10, 11].

Dado que el índice de regularidad longitudinal utilizado en España es el IRI con un intervalo de resultados de 100 m, en los tablos

13, 14, 15, 16 y 17 aparecen únicamente los resultados de las correlaciones entre el IRI y los demás índices cada 100 m. Además, los índices se han dividido en varias categorías, según su algoritmo. Más información sobre cada uno de ellos está disponible en el estudio teórico de índices del Proyecto FILTER [4] y en el artículo publicado en el TRR N° 1764 [7].

Una de las tareas del Proyecto FILTER fue la realización de un análisis teórico de los índices cuyos resultados figuran en el informe del proyecto [4, 5]. En él, aparecen las definiciones de la mayoría de los índices calculados por los equipos. No obstante, no fue posible recopilar la información necesaria de todos los índices. Teniendo en cuenta el análisis, los indicadores se han dividido en varios grupos en función de su algoritmo. Estos grupos son:

- Índices que convierten el perfil longitudinal en PSD (Densidad de potencia espectral).
- Índices basados fundamentalmente en filtrar el perfil utili-



Tabla 12: Resultados de las correlaciones entre índices

ARREV		A	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	W	X	Y	Z	1	2	3	4	5	6	7	
IRI	A		T	T	?	NC	L	L	NC	L	?	NC	L	L	T	L	L	?	?	T	T	NC	NC	NC	L	NC	NC	L	L	NC	
V3	C			NC	NC	NC	T	T	NC	T	NC	NC	T	L	L	T	T	NC	NC	T	NC	NC	NC	T	T	NC	NC	L	L	NC	
V10	D				T	NC	T	T	?	T	T	NC	?	NC	?	NC	T	NC	NC	NC	L	NC	NC	NC	T	?	NC	?	L	NC	
V30	E					NC	NC	T	T	NC	T	?	NC	NC	?	NC	?	T	NC	NC	NC	NC	NC	NC	?	NC	NC	NC	NC		
ISO	F						NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC		
CP2.5	G							NC	NC	L	NC	NC	T	E	?	I	?	NC	NC	T	T	NC	NC	?	L	NC	NC	L	L	NC	
CP10	H								I	NC	L	?	NC	?	?	NC	L	?	NC	NC	T	NC	NC	NC	T	L	NC	L	L	NC	
CP40	I									NC	L	L	NC	NC	NC	NC	NC	L	NC	NC	NC	NC	NC	NC	?	NC	NC	NC	NC		
NBOC	J										NC	NC	T	E	T	L	E	NC	NC	T	T	NC	NC	?	L	NC	NC	L	L	NC	
NBOM	K											?	NC	NC	NC	NC	L	?	?	NC	?	NC	NC	NC	T	T	NC	NC	E	NC	
NBOL	L												NC	NC	NC	NC	?	NC	NC	NC	NC	NC	NC	?	NC	NC	NC	NC	NC		
R5m	M													L	?	T	T	NC	NC	?	?	NC	NC	T	T	NC	NC	L	L	NC	
RN	N														?	E	E	NC	NC	NC	NC	NC	NC	L	E	NC	NC	?	L	NC	
AUN	P																T	T	T	?	NC	?	NC	NC	?	NC	NC	NC	NC	NC	
DS3	Q																	L	NC	NC	?	NC	NC	NC	L	L	NC	NC	E	NC	
DS10	R																		?	?	NC	T	NC	NC	L	?	NC	NC	E	NC	
DS30	S																			?	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
AIP	T																				NC	NC	NC	NC	?	NC	NC	NC	NC	NC	
EOC	W																					NC	NC	NC	NC	T	NC	NC	L	L	NC
EOM	X																						NC	NC	NC	T	L	NC	L	NC	
EOL	Y																							NC	NC	NC	?	NC	NC	L	
DS3m	Z																								NC	NC	NC	NC	NC	NC	
RMSC	1																									NC	NC	?	NC	NC	
RMSM	2																										NC	NC	L	L	NC
RMSL	3																											NC	NC	L	L
VP	4																												NC	NC	NC
NBO'C	5																													L	NC
NBO'M	6																														NC
NBO'L	7																														

Siendo:

- L: correlación lineal.
- L.I: correlación lineal con posibles valores aberrantes.
- E: correlación exponencial.
- E.I: correlación exponencial con posibles valores aberrantes.
- T: correlación potencial.
- T.I: correlación potencial con posibles valores aberrantes.
- Ln: correlación logarítmica.
- Ln.I: correlación logarítmica con posibles valores aberrantes.
- ?: correlación dudosa.
- NC: No existe correlación.

zando una media móvil y calculando posteriormente diferentes parámetros (tales como área contenida, alturas, etc.).

- Índices que utilizan un filtro de Chebyshev.

- Índices basados en modelos de cuarto de coche.

- Índices cuyos algoritmos no se han podido obtener en el Proyecto FILTER.

El IRI no se correlaciona con el índice definido en la Norma ISO

8608. Además, este índice (con código F) no se correlaciona con ningún otro índice de los proporcionados en el experimento (tabla 12). Sin embargo, el índice AUN (código P) sí se correlaciona con algunos índices, incluido el IRI, aunque en principio no se puede establecer una regla fija sobre el tipo de índices con los que tiene correlación.

En la tabla 14 se aprecia que el IRI tiene una buena correlación

con los índices que están fuertemente influenciados por longitudes de onda cortas y medias. Si se analizan los valores de los errores, se aprecia que las correlaciones son ligeramente mejores en el caso de índices en el rango de longitudes de onda cortas.

Hay dos casos en los que es dudosa la correlación: son los que corresponden a la regresión con la varianza de 30 m como se utiliza en el Reino Unido y la regre-



**Tabla 13: Correlaciones entre el IRI cada 100 m y los índices que convierten el perfil en densidad de potencia espectral**

y	x	Expresión	R <sup>2</sup>	Error estándar
IRI	G(n) y w como se define en la Norma ISO 8608	No hay correlación		
IRI	AUN como se utiliza en Alemania	$y = 0,562x^{1,574}$	0,849	2,022

**Tabla 14: Correlaciones entre el IRI cada 100 m y los índices basados fundamentalmente en la utilización de la media móvil**

y	x	Expresión	R <sup>2</sup>	Error estándar
IRI	Varianza de 3 m como se utiliza en el Reino Unido	$y = 0,238x^{1,822}$	0,968	0,815
IRI	Varianza de 10 m como se utiliza en el Reino Unido	$y = 0,946x^{1,914}$	0,961	5,673
IRI	Varianza de 30 m como se utiliza en el Reino Unido	$y = 5,743x^{1,5257}$	0,768	23,680
IRI	Desviación estándar de 3 m, media móvil	$y = 0,401x + 0,130$	0,935	0,207
IRI	Desviación estándar de 10 m, media móvil	$y = 0,922x - 0,037$	0,933	0,519
IRI	Desviación estándar de 30 m, media móvil	$y = 1,552x + 1,2712$	0,759	1,708
IRI	Coefficiente CP 2,5 como se utiliza en Bélgica	$y = 12,846x + 0,010$	0,944	6,087
IRI	Coefficiente CP 10 como se utiliza en Bélgica	$y = 36,626x - 3,954$	0,914	22,011
IRI	Coefficiente CP 40 como se utiliza en Bélgica	No hay correlación		

**Tabla 15: Correlaciones entre el IRI cada 100 m y los índices basados que utilizan un filtro de banda de Chebyshev**

y	x	Expresión	R <sup>2</sup>	Error estándar
IRI	Energía de longitud de onda corta como se utiliza en Francia	$y = 9,195x^{1,926}$	0,888	65,255
IRI	Energía de longitud de onda media como se utiliza en Francia	$y = 54,522x^{1,930}$	0,859	316,414
IRI	Energía de longitud de onda larga como se utiliza en Francia	No hay correlación		
IRI	NBO para longitudes de onda corta como se utiliza en Francia	$y = -4,287L_{px} + 8,745$	0,915	0,948
IRI	NBO para longitudes de onda media como se utiliza en Francia	$y = -4,104L_{px} + 8,940$	0,918	0,890
IRI	NBO para longitudes de onda larga como se utiliza en Francia	No hay correlación		

sión con la desviación estándar de 30 m. Se debe tener en cuenta que la definición de estos dos tipos de índice (varianza y desviación estándar) es prácticamente la misma. De hecho, la desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza. Por tanto, no es sorprendente que las correlaciones existan para los mismos rangos de longitudes de onda.

En el caso de las regresiones entre el IRI y los índices que utilizan un filtro de Chebyshev, se vuelve a apreciar la existencia de correlación con índices sensibles a longitudes de onda cortas y medias. Estos dos tipos de índices (energía de longitud de onda y NBO para diferentes longitudes de

onda) tienen casi la misma definición. De hecho, la única diferencia es que las NBO se transforman en una escala de 0 (peor nota) a 10 (mejor nota). Se trata, por tanto de una escala discreta.

La correlación entre el IRI y el RN existe (como era de esperar), pues, aunque su definición no es la misma, ambos están basados en un modelo de cuarto de coche.

Como resumen del análisis, se podría indicar que, en general, el IRI se correlaciona con los índices que están más influenciados por las longitudes de onda corta y media. En general, no existe correlación con índices fuertemente influenciados por las longitudes de onda largas.

No obstante, los límites de la división entre las longitudes de onda corta, media y larga varían de unos países a otros. Sería interesante avanzar hacia una armonización no solo de las medidas de los equipos, sino de la división en categorías de longitud de onda.

#### **Análisis de la repetibilidad y la reproducibilidad**

El análisis de la repetibilidad y de la reproducibilidad de los índices se ha realizado siguiendo la Norma ISO 5725, equivalente a la Norma UNE 82009 "Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición".

Con el análisis de la repetibilidad se pretende determinar la ca-



**Tabla 16: Correlaciones entre el IRI cada 100 m y los índices basados en el modelo de cuarto de coche**

y	X	Expresión	R <sup>2</sup>	Error estándar
IRI	RN Ride Number	$y = -1.416\text{Ln}x + 3.653$	0,921	0.301

**Tabla 17: Correlaciones entre el IRI cada 100 m y los índices cuyos algoritmos no se han definido en el Proyecto FILTER**

y	X	Expresión	R <sup>2</sup>	Error estándar
IRI	NBO para longitudes de onda corta	$y = 0,251x - 0,012$	0,984	0,062
IRI	NBO para longitudes de onda media	$zy = 0,535e^{0,3317}$	0,837	0,472
IRI	NBO para longitudes de onda larga	No hay correlación		
IRI	Regla de 5 m	$y = 3,933x - 0,039$	0,808	3,742
IRI	Altura de irregularidad periódica	$zy = 1,186x + 1,9897$	0,649	1,705
IRI	Desviación de la regla de 3 m como se utiliza en Rusia	No hay correlación		
IRI	RMS para bandas de onda de 0.5 – 2.5 m	No hay correlación		
IRI	RMS para bandas de onda de 2.5 – 10 m	$y = 0.433x - 0.073$	0.972	0.146
IRI	RMS para bandas de onda de 10 – 50 m	No hay correlación		
IRI	Varianza de la pendiente	No hay correlación		

pacidad de cada equipo de repetir el valor de cada índice en las diferentes pasadas. La repetibilidad se determina como la relación entre la media y su desviación estándar calculada después de unas medidas repetidas de la misma característica en diferentes tramos. La reproducibilidad, sin embargo, se obtiene al comparar los resultados proporcionados por diferentes equipos.

El análisis de la repetibilidad y de la reproducibilidad es importante en este tipo de experimentos, porque los resultados están influenciados por numerosos factores, por ejemplo:

- Factores que dependen de los equipos, de su método de medida o de cómo procesan los datos.
- Definición de los índices en los diferentes equipos.
- Habilidad de los conductores y operarios de los equipos.
- Condiciones de la superficie del firme, del tráfico, etc.

Por ello es importante determinar si los diferentes equipos, con diferentes operarios y que proporcionan los mismos índices, pueden dar una determinada exactitud.

En el informe FILTER sobre medidas de regularidad longitudinal [3] aparecen los resultados obtenidos con más detalle. Sin embargo, aquí sólo se indican las conclusiones principales referidas a los siguientes aspectos:

- Influencia de la velocidad.
- Influencia de los equipos.
- Influencia del índice.
- Influencia de la longitud de cálculo del índice.
- Influencia de los tramos.

Como conclusión general, se puede indicar que los equipos tienen normalmente una buena repetibilidad, y que ésta mejora conforme aumenta el intervalo de resultados.

En lo que se refiere a la reproducibilidad, parece que el equipo, el algoritmo del índice y la regularidad transversal del tramo tienen influencia en los resultados. Sin embargo, aún no se puede determinar el grado de influencia de cada uno de estos parámetros. Para ello sería necesario una investigación más profunda.

#### *Influencia de la velocidad*

Se puede concluir que, en general, la velocidad no ha influido

en la repetibilidad y la reproducibilidad de los índices proporcionados por los equipos. De los índices analizados, parece que los que están basados en valores cuadráticos son más sensibles a la velocidad.

#### *Influencia de los equipos*

Para analizar la influencia de los equipos en los índices, es necesario que varios de ellos hayan obtenido el mismo indicador. Esto ocurre, sobre todo, en el caso del IRI. Las conclusiones para el IRI serían:

- La varianza relativa de la repetibilidad varía del 4% al 9% para valores del IRI en torno a 1, y del 2% al 4% para valores del IRI en torno a 6.
- La varianza relativa de la reproducibilidad varía del 15% al 19% para valores de IRI en torno a 1, y del 6% al 10% para valores de IRI en torno a 6.

En los demás índices proporcionados por más de un participante, los resultados parecen ser peores que para el IRI.

#### *Influencia de los índices*

Como ya se ha indicado, los mejores resultados se han obte-





Ensayo en la pista de la DAF.

nido para el IRI. Por tanto, parece que no hay ningún problema en cómo lo miden los equipos ni en los algoritmos que utilizan para obtenerlo.

Otra conclusión obtenida de este análisis es que, cuanto más sensible es el índice al perfil (menos filtros se utilizan en su algoritmo), menos posibilidades hay de conseguir una buena repetibilidad o reproducibilidad.

## Influencia de la longitud de cálculo del índice

La longitud sobre la que se calcula el índice sí parece tener influencia en la repetibilidad y la reproducibilidad de los equipos. Parece que los resultados son mejores cuanto mayor es esta longitud. En el caso del IRI, la varianza del análisis de reproducibilidad para 50 m es el doble que para una longitud de cálculo de 500 m.

Parece, por tanto, que se debería avanzar hacia decidir cuál es la longitud óptima para cada índice, intentando conciliar la mayor reproducibilidad con la mejor caracterización posible del tramo.

## Influencia del tramo

En este caso el análisis se ha centrado en relacionar la repetibilidad y la reproducibilidad de los índices con la regularidad transversal, pues se asume que una falta de regularidad transversal pue-

de influir en el perfil longitudinal obtenido y en su repetibilidad.

Después de analizar los resultados, parece que la irregularidad transversal puede haber influido en los tramos "O, S, T, U" y la primera parte del "Y", en los que se ha observado una mayor varianza en la repetibilidad y la reproducibilidad.

## Conclusiones

En este artículo se han mencionado algunas de las conclusiones generales que se pueden extraer de las medidas de regularidad longitudinal obtenidas por los participantes en el experimento que forma parte del Proyecto FILTER. No obstante, se debe tener en cuenta que el número de equipos y de resultados obtenidos fue muy elevado. Por tanto, es posible realizar estudios más detallados, como se menciona en el artículo, que permitirían obtener más información sobre aspectos concretos.

En lo que se refiere a los perfiles longitudinales obtenidos por los equipos, parece que, en general, la precisión que se obtiene es mayor para las longitudes de onda medias incluidas en el intervalo [3,125 m, 12,5 m]. La precisión de los equipos para las longitudes de onda corta y larga no es tan elevada. Observando los resultados de cada equipo se apre-

cia que algunos están preparados para ser más precisos dentro del rango de longitudes de onda cortas, mientras que otros lo son para las ondas largas.

Otro aspecto que hay que tener en cuenta es que la precisión de los perfiles longitudinales parece estar influida por los propios tramos, ya que, en algunos tramos concretos, la disminución de la precisión de los perfiles es bastante generalizada entre los equipos. Se puede pensar que alguna característica del tramo ha influido en la medición de los perfiles longitudinales; otra posibilidad es que haya habido un fallo en el propio perfil de referencia. En cualquier caso, este fenómeno es uno de los que necesitaría un estudio más profundo y detallado.

En lo que se refiere a la repetibilidad de los perfiles longitudinales, de nuevo parece mayor para las longitudes de onda medias. También se ha puesto aquí de manifiesto la variación al comparar tramos diferentes.

Otro aspecto es el que se refiere a los índices de regularidad longitudinal. Parece que los resultados obtenidos por equipos diferentes que proporcionaron los mismos índices son sensiblemente parecidos, y no ha existido una influencia apreciable de la velocidad.

Los índices de regularidad longitudinal obtenidos en el experimento han sido muy variados. No obstante, dado que el que se utiliza en España es el IRI cada 100 m, el artículo se ha centrado en el análisis de este índice. En las diferentes tablas aparecen las correlaciones entre el IRI cada 100 m con el resto de los índices, que se han agrupado en función de ciertas características comunes en sus algoritmos o definiciones. Como conclusión general, parece corroborarse que el IRI se correlaciona, en general, con los índices más sensibles a las longitudes de onda cortas y medias, y no lo hace con los que son más sensibles al rango de longitudes de onda lar-



gas. No obstante, los indicadores que se dividen en 3 según el rango de longitudes de onda (índices de energía, NBO, RMS, etc.) no tienen los mismos límites en su separación. Como consecuencia, el IRI se correlaciona mejor con los más sensibles a las longitudes de onda que más le afectan.

Por otra parte, dado que el IRI ha sido calculado por el 85% de los equipos que proporcionaron índices de regularidad longitudinal, parece que ha conseguido su objetivo de ser un indicador internacional. Por otra parte, sus resultados, en lo que se refiere a repetibilidad y reproducibilidad, son los mejores. Esto parece indicar que los filtros utilizados y el algoritmo del índice permiten que no haya problemas en cuanto a la obtención del IRI por diferentes equipos, en diferentes pasadas y a diferentes velocidades.

En lo que se refiere al análisis de la repetibilidad y reproducibilidad de todos los índices, se aprecia que también los mejores resultados corresponden al IRI. Parece que la repetibilidad de los equipos es, en general, satisfactoria; no se ve influida por la velocidad y mejora ligeramente conforme aumenta la longitud de cálculo del índice. No ocurre lo mismo con la reproducibilidad, que parece verse influenciada por el equipo, el algoritmo del índice y la regularidad transversal del tramo. No obstante, no se ha determinado aún cuál es el grado de influencia de cada uno de estos factores.

Sería deseable avanzar hacia la armonización no solo de los métodos de medida, sino también de la definición de una longitud de cálculo óptima para cada índice, que permitiera, al mismo tiempo, la máxima repetibilidad y reproducibilidad.

Como última conclusión, se puede indicar que la amplia base de datos obtenida en el experimento FILTER es muy valiosa, y de ella se pueden obtener múlti-

ples conclusiones y resultados. Aquí únicamente se incluyen algunos aspectos generales sobre la regularidad longitudinal. Sería de mucha utilidad seguir realizando análisis más detallados y compararlos con estudios teóricos, ya que no hay que olvidar que se trata de unos resultados que proceden de un experimento y están sujetos a unos errores aleatorios inevitables, tales como los movimientos transversales de los vehículos en los tramos de ensayo, la habilidad de los conductores, etc.

## Reconocimientos

Se agradece su colaboración a todos los miembros del FEHRL que, además de los autores, han participado en el desarrollo y ejecución del Proyecto: Eckhard Kempkes (BASf), Guy Descornet (BRRC), Sixto Yanguas (CEDEX), Bjarne Schmidt (DRI), Bert De Witt (DWW), Daniel-Marc Ducros (LCPC), Brian Ferne y Martin Willet (TRL), George Magnusson y Leif Sjörgren (VTI), Bojan Leben y Ljubo Petkovic (ZAG).

## Bibliografía

1. **Descornet G.**, "Inventory of High-Speed Longitudinal and Transverse Road Evenness Measuring Equipment in Europe", FEHRL Technical Note 1999/01.
2. **De Witt L.B., Kempkes E., Sjörgren L., Ducros D.M.**, "FILTER experiment. Organization and Carrying-Out a Comparison Experiment of High Speed Longitudinal and Transverse Road Evenness Measuring Equipment Used in Europe", FEHRL Technical Note 1999/02.
3. **Ducros D.M., Petkovic L., Descornet G., Berlemont B., Alonso M., Yanguas S., Jendryka W., Andrén P.**, "FILTER experiment. Longitudinal Analyses", FEHRL Report 2001/01.

4. **Willet M., Magnusson G., Ferne B. W.**, "Theoretical Study of Indices", FEHRL Technical Note 2000/02.

5. **Descornet G.**, "FILTER. Final Report", FEHRL Report 2002/1.

6. **Alonso M., Yanguas S.**, "Indicadores de regularidad longitudinal. Correlaciones obtenidas a partir de los datos del experimento FILTER". Congreso Mundial de la IRF, junio de 2001. París (Francia).

7. **Alonso M., Yanguas S.**, "Analysis of Correlations Between Longitudinal Indices in FILTER Experiment: Forum of European National Highway Research Laboratories Investigation of Longitudinal and Transverse Evenness of Roads Experiment". Transport Research Record Nº 1764. TRB 2001. Washington D.C. (EE.UU.).

8. **Alonso M., Ducros D.M., Petkovic L.**, "FILTER Experiment. Analyses of the Longitudinal Profiles and Indices". SURF 2000, Concluding Workshop (IV Simposio Internacional de Características Superficiales de la AIPCR), mayo de 2000. Nantes (Francia).

9. **Alonso Anchuelo M., Yanguas González S., Achútegui Viada F.**, "Proyecto FILTER sobre comparación y armonización de los métodos de medida de la regularidad superficial de los firmes", 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, noviembre de 1999, Sevilla (España).

10. **Alonso Anchuelo M., Achútegui Viada F.**, "Experimento internacional para la armonización de medidas de regularidad superficial. Proyectos EVEN y FILTER". Revista RUTAS Nº 85, julio-agosto de 2001. Madrid (España).

11. **Alonso Anchuelo M., Achútegui Viada F.**, "Proyecto FILTER. Correlaciones entre índices longitudinales de regularidad superficial", Revista "Ingeniería Civil" Nº 122, abril, mayo y junio de 2001. Madrid (España). ■