

El proyecto SafetyNet para la obtención de Indicadores de velocidad de flujo libre: contribuciones metodológicas y aplicación al caso español.

José Manuel Mira Mc Williams⁽¹⁾

Francisco Aparicio Izquierdo⁽¹⁾

Blanca Arenas Ramírez⁽¹⁾

Francisco Jiménez Ruiz⁽¹⁾

M^a Anuncia Ocampo Sanchez⁽²⁾

Pilar Zori Bertolín⁽²⁾

José A. Bartolomé Marcos⁽²⁾

⁽¹⁾INSIA. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. UPM. ⁽²⁾Dirección General de Tráfico.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de las recomendaciones del proyecto europeo SafetyNet para la estimación de indicadores de SPI (Safety Performance Indicators) de la velocidad de flujo libre (VFL), es decir, circulación en tramos en perfectas condiciones de firme y visibilidad y tráfico moderados, de forma que la única restricción que se le presenta al conductor es la velocidad que marca la ley, con el objetivo de tener un marco común de indicadores (en este caso el de VFL) en los países europeos.

Para ello, en España, se ha diseñado un muestreo estratificado por regiones, dividiendo el territorio en 8 regiones: Andalucía (R-1); Meseta Central excluyendo Madrid, es decir, las dos Castillas y Extremadura (R-2); Madrid (R-3); Valencia y Murcia (R-4); Cataluña (R-5); Galicia y Asturias (R-6); País Vasco, Navarra, Cantabria y La Rioja (R-7) y Aragón (R-8). Se han elegido al azar 100 puntos de observación repartiendo en cada estrato región-tipo de vía proporcionalmente a las poblaciones e IMD respectivamente. Se ha estimado la distribución de la VFL en cuatro tipos de vía (autopistas, autovía, carreteras convencionales de la red estatal y autonómicas con dos tipos de límite de velocidad: 90 y 100 km/h y tres tipos de vehículos (ligeros, motos y pesados). Los tramos de la muestra fueron sometidos a dos fases de verificación del cumplimiento de las recomendaciones de SafetyNet para la obtención de los indicadores de VFL: la primera fase de gabinete, con herramientas informáticas y la segunda fase in situ, cuya criba y reemplazo de los tramos seleccionados en la etapa de gabinete, ha sido mínima. Se han instalado dispositivos de medición de velocidades muy precisos en cada punto de observación. Aunque la hipótesis de normalidad (distribución gaussiana) es habitual en estudios de velocidad y en muchos casos razonable a la luz de los datos, en este estudio se ha utilizado la herramienta estadística más general, no paramétrica de bootstrap en inglés o remuestreo en español. Los resultados de las mediciones nocturnas superan claramente el límite establecido por la ley y los valores diurnos, lo cual podría conducir a recomendar mayor

vigilancia de la velocidad en tipos de vías y horarios concretos.

Se ha estimado la distribución de velocidades dando valores puntuales e intervalos de confianza para la velocidad media, desviación típica, percentiles (85%, 2,5% y 97,5%), así como la proporción de vehículos que superan la velocidad máxima permitida por la ley y de vehículos que superan la velocidad máxima permitida por la ley en 10 km/h.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta ponencia es presentar los trabajos realizados por el INSIA, por encargo y en colaboración de la DGT, en el proyecto piloto español de estimación de Indicadores de la distribución de velocidad de flujo libre, en el marco de las recomendaciones del proyecto SafetyNet para el Observatorio Europeo de Seguridad Vial (ERSO).

El diseño de la muestra incluye tramos de autopistas, autovías y carreteras convencionales de la RCE, autopistas, autovías y carreteras de la red principal y secundaria (tipo1 y tipo2) de las Comunidades Autónomas, y se realizó para vehículos ligeros, pesados y motos en diferentes franjas horarias, fuera de períodos punta o de alteraciones de tráfico por eventos especiales. Los tipos de vehículos se han establecido por un criterio de longitud.

Las fases de la experiencia piloto se pueden resumir en:

- 1) Preparación de una amplia base de datos de tramos de los distintos tipos de vías de España.
- 2) Elaboración de un programa informático en lenguaje Matlab, para selección de la muestra y análisis de resultados.
- 3) Diseño de la muestra, obtenida por muestreo estratificado por regiones, franjas horarias, tipos de vías y tipos de vehículos, para reducir la incertidumbre de las estimaciones y poder conocer por separado la distribución de la velocidad de flujo libre en cada estrato.
- 4) Trabajo de gabinete para comprobar la validez de los segmentos seleccionados según las condiciones de SafetyNet. Esta tarea se ha realizado apoyándose en cartas digitales y sistemas de información geográfica, para verificar la validez de los tramos (curvatura, pendiente, etc.).
- 5) Trabajo de campo para comprobar in situ la aptitud de los segmentos, mediante procedimientos y elementos de control.
- 6) Toma de datos
- 7) Análisis de las medidas tomadas y validación según las condiciones y requisitos de SafetyNet.
- 8) Elaboración de un informe final de conclusiones y recomendaciones.

2. CONDICIONES DE SAFETYNET PARA LOS SPI DE VFL. METODOLOGÍA. OBTENCIÓN DE LOS DATOS.

2.1 Condiciones de flujo libre en el Proyecto SafetyNet

Para asegurar la fiabilidad y posibilitar la intercomparabilidad de las medidas a nivel europeo, el manual de SafetyNet recomienda que los emplazamientos en los que se realicen las mediciones de velocidad, sean tales que no alteren la velocidad de los vehículos, por factores

ajenos a la voluntad de sus conductores. Estas localizaciones deben:

- estar localizados en una sección recta y uniforme de carretera.
- estar en una sección en la que sea posible superar el límite de velocidad.
- estar en una sección con pendiente menor del 5% en los 500 m precedentes.
- estar alejados de intersecciones (al menos 500 m).
- estar alejados de dispositivos de reducción de la velocidad (al menos 500 m).
- estar alejados de obras en la carretera (al menos 500 m).
- estar alejados de pasos de peatones (al menos 500 m).
- estar alejados de puntos de cambio del límite de velocidad o señales (al menos 1000 m)
- estar alejados de zonas de trabajo, de aparcamientos, u otras circunstancias próximas a la carretera.
- existir buenas condiciones del pavimento o la superficie.
- estar alejados de cambios de rasante (al menos 500 m).

Teniendo en cuenta estas condiciones en los supuestos más restrictivos, el código en lenguaje MATLAB desarrollado realiza la selección previa de la muestra con tramos que tengan una longitud mínima de 5 km.

En todas las estaciones y sus observaciones se ha controlado la calidad de datos y se ha realizado una selección por día de la semana (acotada a los martes, miércoles y jueves, no festivos, ni anterior ni posterior a festivo) y rangos horarios (con el objeto de evitar aglomeraciones y horas punta):

- 10:00 a 10:59 y 15:00 a 15:59 para diurno
- 22:00 a 22:59 para nocturno.)

También se han contemplado predicciones meteorológicas en los puntos de medida (global del día y de la zona) de AEMET, y datos meteorológicos horarios de estaciones meteorológicas de la DGT más o menos próximas, con el fin de depurar la base de datos de tramos horarios y períodos con condiciones climáticas adversas.

Adicionalmente se ha tenido en cuenta la recomendación adicional de SafetyNet de separación entre vehículos de por lo menos 5 segundos.

2.2 Muestreo estratificado.

El muestreo es estratificado por regiones y tipos de vía. Las 8 regiones definidas, responden a la hipótesis de un comportamiento homogéneo en cada estrato. Figura 1.

La estratificación por 5 tipos de vía: Autopistas (AP), Autovías (AV-APL), carreteras convencionales (C) de la RCE y de la red autonómica de primer orden (CA1) y de segundo orden (CA2), se muestra en la Figura 2. La muestra realizada representa el 88,12% del total de puntos preseleccionados inicialmente, estando este recorte de la muestra original motivado por algunas incidencias durante el proceso de medición, pero que no alteran la representatividad de cada estrato previsto en el diseño original de la muestra. Debido a la restricción legal de velocidad, las vías convencionales autonómicas y de la RCE, se han reagrupado a su vez en dos grupos: el de vías convencionales con límite de velocidad 90 y 100 km/h respectivamente.

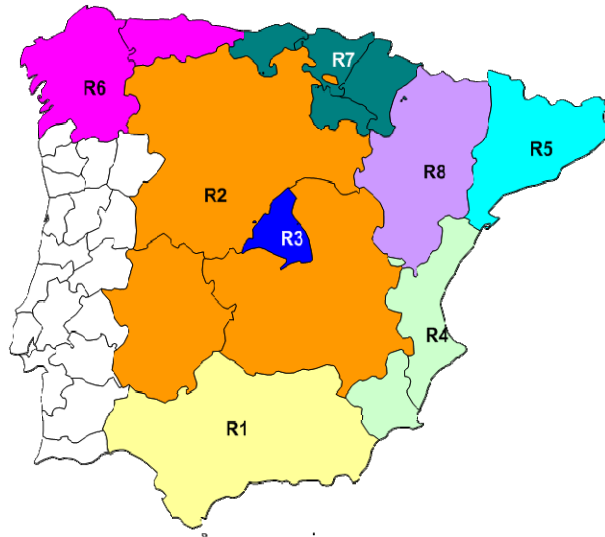


Figura 1 – Criterio de estratificación regional para el muestreo

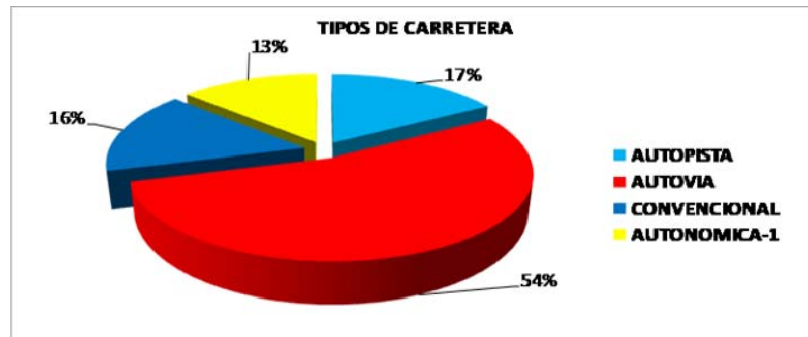


Figura 2 – Distribución final de la muestra por tipo de vía

3. OBTENCIÓN DE LOS INDICADORES SPI (SAFETY PERFORMANCE INDICATORS) DE VELOCIDADES DE FLUJO LIBRE.

3.1 Metodología estadística del proceso de estimación

La estimación de la distribución de velocidades implica:

1ª) La estimación de medidas de centro, típicamente la media, que es la que se utiliza en este estudio como valor en torno al cual oscilan los datos, y la estimación de la incertidumbre o variabilidad de los datos, que en este estudio se mide a través de:

- la varianza o, su raíz cuadrada, la desviación típica
- y los percentiles de la distribución: 2,5%, 85% y 97,5%; el intervalo comprendido entre los percentiles del 2,5 y el 97,5 incluyen el 95% central de los datos.

2ª) Los intervalos de confianza para la media, varianza e incluso para los percentiles estimados. Cuanto más anchos sean los intervalos, mayor es la incertidumbre de la estimación, que es un reflejo (también influye el tamaño de muestra en la amplitud de los intervalos) de la variabilidad de los datos.

3ª) Adicionalmente, se han estimado de una forma general los porcentajes de vehículos que superan la velocidad máxima permitida y la velocidad máxima permitida + 10 km/h.

- Aunque la distribución de velocidades suele aproximarse razonablemente a la normal,

para este análisis se ha empleado la técnica no paramétrica (es decir no dependiente de hipótesis sobre el tipo de distribución) de remuestreo o bootstrap.

3.2 Metodología del proceso de agregación

A continuación describimos cómo se han obtenido los diferentes indicadores:

- Estimación puntual de la media.

La expresión del estimador es: $\mu = w_1 \bar{x}_1 + w_2 \bar{x}_2 + w_3 \bar{x}_3 + \dots + w_8 \bar{x}_8 = \sum_{i=1}^8 w_i \bar{x}_i$

donde w_1, w_2, \dots, w_8 son los pesos relativos de los estratos y $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_8$ son las medias en cada estrato. Los pesos relativos son proporcionales a las poblaciones de los estratos.

- Intervalo de confianza de la media.

El intervalo de confianza se obtiene a partir del método de remuestreo o bootstrap. En muestreo estratificado se remuestra en cada estrato y se obtienen las medias replicadas con la misma ponderación que en la estimación puntual.

- Estimación puntual de la varianza.

En este estudio se ha adoptado el siguiente estimador puntual:

$$\sigma_{st}^2 = \sum_{h=1}^2 w_h \sigma_h^2 + \sum_{h < g} w_h w_g (\mu_h - \mu_g)^2$$

donde σ_i^2 y μ_i son las varianzas y medias, respectivamente, de los estratos, y w_i son los pesos relativos ya definidos anteriormente.

- Intervalo de confianza de la varianza.

Al igual que en el caso de la media, se obtienen las réplicas de las varianzas aplicando el estimador puntual a las réplicas de las muestras de los estratos.

- Estimación puntual de los percentiles.

Este procedimiento se aplica a la estimación de los percentiles del 2,5%, 97,5% y 85%. Los dos primeros delimitan el 95% central de la población y el último percentil forma parte de los requerimientos de SafetyNet. Para ello, se ordenan las muestras de los estratos y luego a cada elemento de la muestra se le da un peso relativo proporcional al peso del estrato en la población; a continuación, se obtiene el estimador puntual del percentil como el correspondiente percentil en la muestra ponderada, del conjunto de medidas realizadas.

- Intervalos de confianza de los percentiles.

Al igual que en los casos de la media y la varianza, se obtienen las réplicas de las varianzas aplicando el estimador puntual a las réplicas de las muestras de los estratos.

- Estimador de la función de distribución.

La aplicación de este parámetro es a la proporción de vehículos que superan la velocidad máxima permitida o dicha velocidad + 10 km/h.

El estimador puntual se obtiene a partir de la muestra ordenada y ponderada como se describió anteriormente, como el peso acumulado correspondiente al valor para el cual se quiere calcular la función de distribución (velocidad máxima permitida o velocidad máxima permitida + 10 km/h).

4. RESULTADOS.

Para la obtención de los SPI el número total de mediciones contempladas (debido a los criterios de filtrado de SafetyNet aplicados: día, hora, condiciones meteorológicas, intervalo de 5 segundos), ha sido de 83.550, que supone el 1,02% del volumen total de datos medidos. Un resumen de los principales indicadores de la distribución de velocidad de flujo libre (valores puntuales e intervalos de confianza para la velocidad media, desviación típica y percentil 85%), así como la proporción de vehículos que superan la velocidad máxima permitida por la ley y de vehículos que superan la velocidad máxima permitida por la ley en 10 km/h.) en autopistas y autovías se muestran en Tabla 1 y Tabla 2 respectivamente.

AUTOPISTAS		LI 95%	Vm	LS 95%	LI 95% DS(v)	DS (v)	LS 95% DS(v)	LI 95% p85	p 85	LS 95% p85	p > vl	p > vl+10 km/h	n
MOTOS	dia	106,61	112,81	120,01	16,93	19,90	21,72	131	136	138	0,4559	0,3101	51
	noche	119,09	124,76	132,19	7,59	14,74	20,59	125	131	145	0,6667	0,1905	21
LIGEROS	dia	121,89	122,26	122,6	16,38	16,77	17,20	137	137	138	0,571	0,2889	10025
	noche	122,06	123,43	124,9	17,60	19,19	20,69	139	140	142	0,5867	0,3315	2782
PESADOS	dia	92,98	93,6	94,12	12,59	13,22	13,99	103	106	110	0,2022	0,1372	2561
	noche	92,71	93,84	95,25	10,24	11,82	13,51	101	102	105	0,1916	0,1088	663

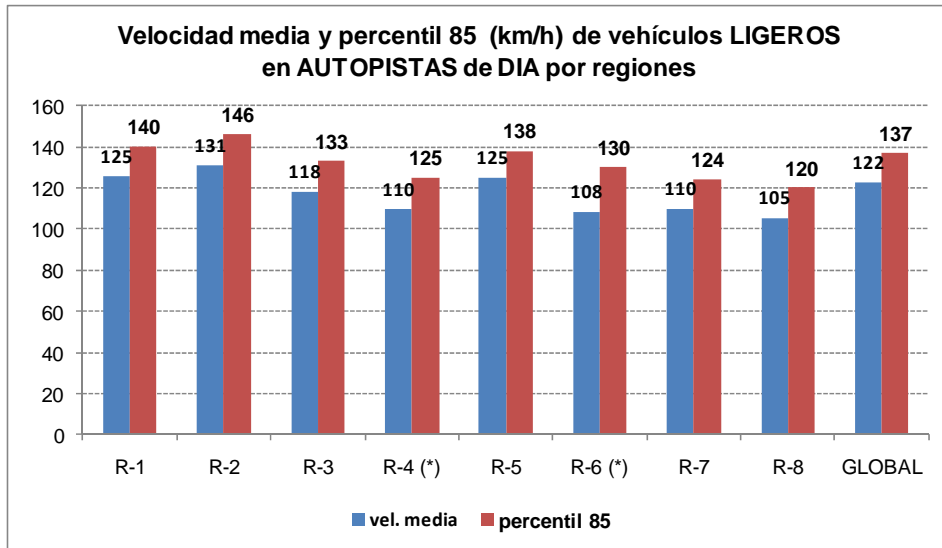
Tabla 1: Valores estadísticos de la distribución de VFL en el territorio nacional. Autopistas.

AUTOVIAS		LI 95%	Vm	LS 95%	LI 95% DS(v)	DS (v)	LS 95% DS(v)	LI 95% p85	p 85	LS 95% p85	p > vl	p > vl+10 km/h	n
MOTOS	dia	103,54	107,6	111,38	19,58	22,49	25,27	126	129	133	0,2899	0,1412	318
	noche	113,89	119,09	124,04	23,42	26,36	28,41	138	141	147	0,5121	0,3931	53
LIGEROS	dia	115,2	115,47	115,74	17,37	17,63	17,87	131	131	131	0,3783	0,1725	26734
	noche	116,09	116,6	117,1	17,55	17,99	18,45	131	131	132	0,3496	0,1709	10883
PESADOS	dia	92,66	92,96	93,29	11,74	12,17	12,56	101	102	103	0,1696	0,1005	8939
	noche	91,88	92,42	92,99	10,73	11,48	12,35	97	97	98	0,128	0,0739	3192

Tabla 2: Valores estadísticos de la distribución de VFL en el territorio nacional. Autovías.

Por razones de extensión, en este trabajo se presentan los resultados de velocidad media y percentil 85 (por regiones y estimación global) en autopistas y autovías, para vehículos ligeros en horario diurno, aunque en las conclusiones se hace referencia a resultados más generales. En la Figura 3, se muestran los valores de las velocidades medias y el percentil 85 de vehículos ligeros en autopistas en horario diurno en cada región del diseño de la muestra. Es de destacar que el valor del percentil 85, en todos los casos supera en más de un 10% el valor

de la velocidad media.



(*) En las regiones R-4 y R-6 se han incluido valores de Autovías ante la ausencia de este tipo de vía en la muestra correspondiente.

Figura 3 –Velocidades medias y percentil 85 de Ligeros en Autopistas en horario diurno

En la Figura 4 se muestran los valores de las velocidades medias y el percentil 85 de vehículos Ligeros en autovías en horario diurno. Al igual que en autopistas, el valor de este percentil en todos los casos supera en más de un 10% el valor de la velocidad media.

En la Figura 5, se muestra la velocidad media de los 10 vehículos más rápidos en Autopistas, en cada región, para las que no se ha realizado ningún tipo de filtrado en cuanto a tipo de vehículo, ni fechas, ni rango horario, ni se ha tenido en cuenta la presencia de condiciones climáticas adversas. En ella se observa que el valor de la media global, alcanza los 200,38 km/h. (no se incluyen las regiones R-4 y R-6 por ausencia de este tipo de vía en el diseño muestral.). En la Figura 6, se muestra la velocidad media de los 10 vehículos más rápidos en Autovías, en las 8 regiones, en las que al igual que el caso anterior de autopistas, no se ha realizado ningún tipo de filtrado. La media global alcanza los 196,69 km/h.

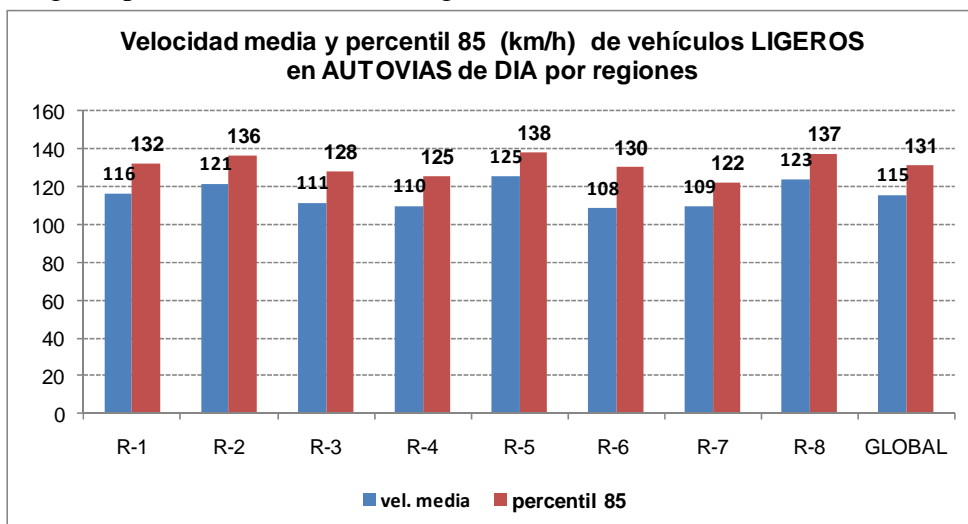


Figura 4 –Velocidades medias y percentil 85 de Ligeros en Autovías. Horario diurno

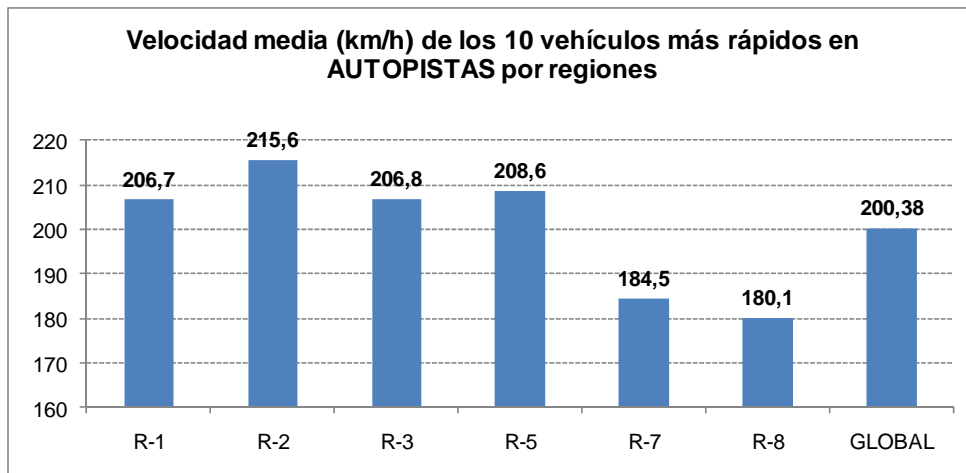


Figura 5 –Velocidades medias de los 10 vehículos más rápidos en Autopistas

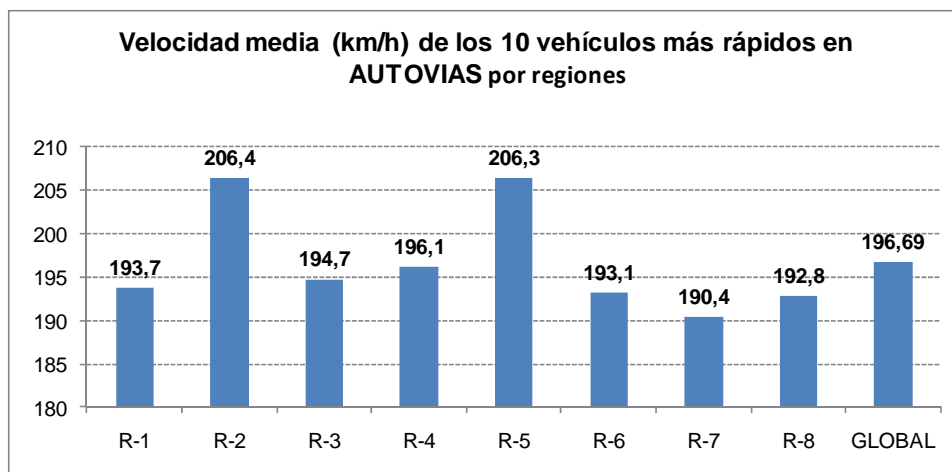


Figura 6 –Velocidades medias de los 10 vehículos más rápidos en Autovías

5. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- Se ha aplicado una metodología avanzada (remuestreo o bootstrap) para la obtención de intervalos de confianza de todos los SPI elegidos; habiendo obtenido intervalos de confianza bastante estrechos (la máxima amplitud corresponde a las velocidades medias de motos).
- Se han estimado bastantes parámetros desde el punto de vista de la seguridad, son muy interesantes los percentiles del 85% y 97,5% ya que, el comportamiento de los conductores cuyas velocidades se alejan más del valor medio, es relevante para la seguridad. Estos parámetros guardan una estrecha relación con el porcentaje de vehículos que superan en 10 km/h o más la velocidad máxima autorizada, que de forma global (o ponderado) se ha determinado en un 20,26% en condiciones de flujo libre.
- Los indicadores para motos indican un comportamiento más moderado que el de ligeros, aunque estos datos hay que tomarlos con cierta cautela ya que los tamaños de muestra de motos son relativamente bajos.
- Hay pocas diferencias entre día y noche, aunque en general son algo mayores los valores nocturnos. Este dato es relevante desde el punto de vista de la seguridad, por la menor

visibilidad y riesgo de deslumbramientos en horarios nocturnos y posible incremento de riesgo de accidentes.

6. REFERENCIAS

- Gross, S.T. (1980). Median estimation in sample surveys. Proc. Surv. Res. Meth. Sect., Amer. Statist. Assoc., pp. 181-184.
- Ruiz-Espejo, M. (1993). Nuevos estimadores de la varianza en poblaciones finitas. Questioo, vol. 17, 2, pp. 203-219.
- Hakkert, A.S.; Gitelman, V. (Eds.) (2007). Road Safety Performance Indicators: Manual. Deliverable D3.8 of the EU FP6 project.
- Hakkert, A.S.; Gitelman, V., Vis, M.A. (Eds.) (2007). Road Safety Performance Indicators: Theory. Deliverable D3.6 of the EU FP6 project.