

Influencia de la señalización y el balizamiento en la siniestralidad en curvas de carreteras convencionales

Effect of signs and traffic guidance equipment on road crashes occurrence on curves of two-lane rural roads

Ana María Pérez-Zuriaga

Profesor Ayudante, Grupo de Investigación en Ing. de Carreteras
Universitat Politècnica de València

Alfredo García

Catedrático, Grupo de Investigación en Ing. de Carreteras
Universitat Politècnica de València

Francisco Javier Camacho-Torregrosa

Profesor Ayudante, Grupo de Investigación en Ing. de Carreteras
Universitat Politècnica de València

Vidal Gascón Culebras

Personal Investigador, Grupo de Investigación en Ing. de Carreteras
Universitat Politècnica de València

Resumen

La siniestralidad en carreteras es uno de los principales problemas de la sociedad actual, especialmente en carreteras convencionales, siendo las transiciones recta-curva los puntos más conflictivos del trazado. De hecho, se estima que en ellos se concentra más del 50 % de la totalidad de los accidentes mortales en carreteras. Una de las variables consideradas de mayor influencia en la aparición de accidentes en curvas es la consistencia del trazado, así como también la densidad de señalización y balizamiento. Por ello, en el estudio que se presenta se ha evaluado y analizado la influencia de la señalización y el balizamiento, para un nivel de consistencia determinado, en la siniestralidad en curvas de carreteras convencionales.

Para ello, se ha llevado a cabo un inventario de la señalización y el balizamiento existente en 1.354 curvas correspondientes a 66 tramos de carreteras convencionales de la provincia de Valencia. En él, se ha incluido para cada curva: sus características geométricas; el perfil de velocidad de operación de la transición recta-curva correspondiente; las señales y los elementos de balizamiento existentes, así como la distancia de éstos al inicio de la curva. La base de datos resultante se ha completado con las bases de datos de siniestralidad y tráfico facilitadas por las administraciones titulares de las carreteras.

El análisis pormenorizado de la influencia de las variables analizadas en el índice de peligrosidad registrado en las curvas estudiadas ha arrojado diferentes conclusiones. Entre ellas, destaca que, para un mismo nivel de consistencia, el hecho de añadir múltiples paneles direccionales no mejora este índice, mientras que sí se observa un índice menor en curvas con presencia de señalización de límite de velocidad. La información de este estudio puede sentar las bases para un empleo más eficiente de la señalización y el balizamiento en curvas.

PALABRAS CLAVES: carretera, señalización, balizamiento, seguridad vial, diseño geométrico, consistencia.

Abstract

Road crashes is one of the most important problems of today's society, especially on two-lanes rural roads. Besides, tangent-to-curve transitions are considered the most conflictive points spots since they concentrate more than 50 % of all crashes. Road design consistency and the density of signs and traffic guidance equipment are the mostly related parameters to road crashes. This study has examined the influence of signs and traffic guidance equipment on road crashes, considering a specific consistency level.

66 two-lane rural roads segments in Valencia (Spain), including 1,354 curves, were characterized. The following parameters were extracted for each curve: geometry; tangent-to-curve transition operating speed profile; signs and traffic guidance equipment identification and location. The resulting database was completed with crash and traffic data, thanks to road Administrations.

The analysis of how those parameters influenced crash rates allowed the authors to extract several conclusions. The most important one is that crash rates do not vary with the number of chevron panels, for a specific road design consistency level. Conversely, a lower crash rates were observed on curves with posted speed limits.

The conclusions of this research may lay the foundations for a more efficient use of the signs and traffic guidance equipment on curves.

KEY WORDS: two-lane rural road, sign, traffic guidance equipment, road safety, geometric design, consistency.

1. Introducción

Los accidentes de tráfico están entre las diez primeras causas de mortalidad en la sociedad española. En la ocurrencia de estos eventos influyen principalmente el factor humano, la infraestructura y el vehículo. Diferentes estudios destacan que el factor infraestructura está presente en el 30 % de los accidentes que se producen en carretera (Treat *et al.*, 1979). Estos accidentes tienden a concentrarse en las carreteras convencionales y, especialmente, en las transiciones recta-curva, constituyendo éstas los puntos más conflictivos del trazado. De hecho, investigaciones previas (Lamm *et al.*, 1992) han estimado que más del 50 % de la totalidad de los accidentes mortales en carreteras se concentran en estas alineaciones.

El porcentaje de influencia de las características geométricas de la carretera sobre la ocurrencia de accidentes aumenta al disminuir la consistencia de su diseño geométrico, definida como el ajuste del comportamiento de la carretera a las expectativas de los conductores. La mayoría de los modelos desarrollados para la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de carreteras se basan en cuatro áreas principalmente: la velocidad de operación y sus variaciones, la estabilidad vehicular, los índices del trazado y la carga de trabajo del conductor (Ng y Sayed, 2004; Awata y Hassan, 2002). Entre ellos, los criterios más utilizados a nivel mundial son los basados en la evaluación de la velocidad de operación, distinguiendo entre modelos locales (Lamm *et al.* 1999; García *et al.*, 2013a) y globales (Polus y Mattar-Habib, 2004; Camacho-Torregrosa *et al.*, 2013).

Además de la geometría de su trazado, otro de los elementos que pueden aumentar el porcentaje de influencia de la carretera en la aparición de accidentes son los elementos de señalización y balizamiento instalados en ella. Como señalan Lamm *et al.* (2000), la señalización vertical y

horizontal puede aumentar la seguridad vial de una sección. Sin embargo, estas mejoras raramente son sustanciales y en ningún caso son tan significativas como para transformar un diseño "pobre" en un diseño "bueno".

Para llegar a esta conclusión, llevaron a cabo un estudio sobre 79 tramos de carreteras rurales de dos carriles, donde evaluaron la influencia de tres niveles de equipamiento vial en la tasa de accidentes. El nivel 1 de los definidos comprendía la señalización horizontal básica. El nivel 2 englobaba la señal de advertencia de curva peligrosa, de advertencia de peligro por cambio brusco de dirección, de advertencia de rampas, de límite de velocidad y los paneles direccionales con hasta tres flechas, individuales o en una placa, así como las combinaciones de ambas tipologías. El nivel 3 estaba compuesto por el equipamiento vial que excede el nivel 2. En este estudio, ni siquiera el mayor nivel de señalización instalado en un tramo de carretera con un diseño calificado con consistencia "pobre" tuvo la suficiente influencia como para que los valores de la tasa de accidentalidad alcanzaran los valores propios de un diseño clasificado como "bueno".

No sólo es importante el nivel de señalización instalado, sino también cómo ésta está instalada. Algunos estudios han registrado reducciones importantes en la frecuencia de accidentes debido al empleo adecuado de la señalización vertical, así como un descenso en las tasas de fallecidos y de heridos.

Considerando que la velocidad desarrollada puede utilizarse como medida sustitutoria de la seguridad vial, diferentes estudios han analizado la influencia del tipo de señal instalada en diferentes curvas sobre la velocidad desarrollada en ellas. Charlton (2004) llevó a cabo un estudio con 30 voluntarios circulando en un escenario implementado en un simulador de conducción consistente en un tramo de carretera convencional. El escenario estaba formado por

12 curvas de diferentes características, en las que aparecía de forma aleatoria uno de los cuatro niveles de advertencia prefijados: ausencia de advertencia, señal de advertencia de peligro de curva peligrosa junto con la velocidad recomendada, panel direccional con tres flechas con velocidad recomendada y marcas viales con la velocidad recomendada pintada en la calzada.

Entre otros resultados, se concluyó que cuanto menor era la velocidad recomendada, menor era la velocidad media de paso por la curva, aunque las diferencias no eran significativas. Asimismo, se comprobó que con la velocidad recomendada mayor, la señal que mayor reducción de velocidad producía era el panel direccional.

Con base en este estudio, Charlton (2007) llevó a cabo otro estudio, también con simulador de conducción, con una muestra de 60 conductores. Los escenarios estaban compuestos por curvas con diferentes tipos de señalización. El primer grupo de escenarios consistió en: señal de advertencia de curva con hitos de arista; con hitos de arista y paneles direccionales de tres flechas con velocidad recomendada; con hitos de arista y sucesivos paneles direccionales de una flecha; con hitos de arista, con un panel direccional de tres flechas con velocidad recomendada y con sucesivos paneles direccionales de una flecha. El segundo grupo de escenarios estaba formado por señales de advertencia de curva e hitos de arista con diferentes tipos de marcas viales: eje con línea discontinua; eje con doble línea continua amarilla; eje con doble línea continua con resaltes; y eje con línea discontinua con aspas que disminuyen el ancho de los carriles y el ángulo de giro de las curvas. Finalmente, implementaron diferentes escenarios con la combinación de la señalización vertical, los elementos de balizamiento y las marcas viales enumeradas. Tras el estudio se concluyó que los diferentes elementos adicionales suponen una disminución de la velocidad.

Como puede observarse, son pocos los estudios que han analizado la influencia de la señalización y el balizamiento en la seguridad vial. Además, la mayoría se han llevado a cabo con una muestra reducida, por lo que los resultados pueden suponer un punto de partida pero no pueden considerarse finales.

2. Objetivos e hipótesis

El principal objetivo de la investigación que se presenta es estudiar la influencia de los elementos de señalización y balizamiento en la siniestralidad ocurrida en curvas de carreteras convencionales, diferenciando entre los distintos niveles de consistencia.

Para ello, el estudio se ha basado en la hipótesis de que el tipo, la cantidad y la disposición de la señalización y el balizamiento en una curva tienen una influencia significativa en la siniestralidad. Sin embargo, esta influencia no se considera tan importante como para conseguir que un diseño con un nivel de consistencia “pobre” presente una siniestralidad propia de un diseño con un nivel de consistencia “buena”, es decir, no es capaz de compensar limitaciones de consistencia.

3. Desarrollo

En el presente apartado se muestra el procedimiento que se ha llevado a cabo para la obtención de los datos en los que basar el estudio, así como el posterior análisis de los mismos, necesario para la consecución del objetivo descrito en el apartado anterior.

3.1. Tratamiento de datos

El estudio se ha desarrollado a partir de una amplia base de datos de curvas de carreteras convencionales que ha incluido para cada curva: su identificación, sus características geométricas, su volumen de tráfico, los accidentes registrados en ella, la velocidad de operación en la correspondiente transición recta-curva, su

nivel de consistencia y los elementos de señalización y balizamiento instalados en la misma.

3.1.1. Identificación y caracterización geométrica de las curvas

La investigación se ha centrado en el análisis de 33 tramos de carretera convencional, situados en la provincia de Valencia. En ellos, se han identificado 677 curvas, que, considerando ambos sentidos de circulación, constituyen 1.354 curvas a efectos del estudio.

Una vez identificados los tramos de carretera a incluir en el estudio, se ha procedido a la restitución de su geometría en planta con base en las fotografías aéreas proporcionadas por la aplicación *Google Earth*. La metodología utilizada se basa en clicar sobre sucesivos puntos del eje de la carretera para la obtención de sus coordenadas. Con los datos de posición resultantes, se ha restituido la geometría del trazado en planta de cada uno de los tramos según la metodología desarrollada por Camacho-Torregrosa *et al.* (2014). De esta forma, se han obtenido los correspondientes estados de alineaciones, en los que se incluyen todas las características geométricas de los elementos objetos de estudio.

3.1.2. Volumen de tráfico

Los datos de aforos de volúmenes de tráfico han sido facilitados por la administración competente correspondiente a los tramos de carretera estudiados (*Conselleria* de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente). La base de datos disponible proporciona los valores de intensidad media diaria (IMD) desde el año 2001 hasta el año 2010.

3.1.3. Accidentalidad

Los datos de accidentalidad han sido facilitados por la misma administración. En este caso, se dispone de

los accidentes ocurridos en los años citados con información relacionada con el punto kilométrico en el que se ha producido cada accidente, el número de víctimas clasificadas según su gravedad, la posible causa del accidente y el tipo de configuración en la que se ha producido. Gracias a estos datos, se ha podido determinar la localización de los accidentes, incluyendo, no sólo el punto kilométrico en el que se han producido, sino también el sentido de circulación de los vehículos involucrados.

Sin embargo, la asignación de los accidentes a las curvas estudiadas no ha sido inmediata, debido a que la localización de los accidentes está registrada con una precisión de hectómetros. Por ello, se ha tenido que establecer un criterio de asignación de accidentes a curvas. Este criterio se basa en la asignación de un accidente a una curva siempre y cuando el hectómetro en el que se produce este accidente se solape con el desarrollo de la curva o con el hectómetro posterior a ésta, diferenciando entre ambos sentidos de circulación.

De todos los datos disponibles únicamente se han considerado los accidentes en los que ha habido víctimas y se han excluido aquellos en los que las causas eran claramente ajenas a la carretera, como por ejemplo los causados por atropello de animales.

A partir de estos datos, y de los de volumen de tráfico se ha calculado para cada una de las curvas el índice de peligrosidad, definido como el número de accidentes con víctimas producidos por cada 100 millones de vehículos que pasan por la curva.

3.1.4. Estimación de la velocidad de operación

A partir de los estados de alineaciones, obtenidos de la restitución de la geometría de cada uno de los tramos, se han estimado los correspondientes perfiles de velocidad de operación. Para ello, se han utilizado los modelos

propuestos por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010) y Camacho-Torregrosa *et al.* (2013) para la estimación de la velocidad de operación en rectas y curvas y de las tasas de deceleración y aceleración que permiten su unión para, finalmente, disponer de los perfiles de velocidad de operación continuos.

Las ecuaciones (1), (2) y (3) muestran los modelos utilizados para la estimación de la velocidad de operación en curvas.

$$V_{85C} = 97,4254 - 3310,94/R$$
$$400\text{ m} < R \leq 950\text{ m} \tag{1}$$

$$V_{85C} = 102,048 - 3990,26/R$$
$$70\text{ m} < R \leq 400\text{ m} \tag{2}$$

$$V_{85C} = 127 \cdot R \cdot (f_t + e/100)$$
$$R \leq 70\text{ m} \tag{3}$$

donde: V_{85C} es la velocidad de operación en curva (km/h); R es el radio de la curva (m); f_t es el coeficiente de rozamiento transversal movilizado; y e es el peralte de la curva (%).

La ecuación (4) muestra el modelo para la estimación de la velocidad en rectas.

$$V_{85T} = V_{85C} + (1 - e^{-\lambda \cdot L}) \cdot (V_{des} - V_{85C}) \tag{4}$$

donde: V_{85T} es la velocidad de operación en rectas (km/h); L es la longitud de la recta (m); V_{des} es la velocidad deseada (110 km/h); y λ viene dada por la ecuación (5).

$$\lambda = 0,00135 + (R - 100) \cdot 7,00625 \cdot 10^{-6} \tag{5}$$

Las ecuaciones (6) y (7) se corresponden con los modelos para la obtención de las tasas de deceleración y de aceleración.

$$d_{85} = 0,313 + 114,436/R \tag{6}$$
$$a_{85} = 0,41706 + 65,93588/R \tag{7}$$

donde: d_{85} es la tasa de deceleración (m/s^2) y a_{85} la tasa de aceleración (m/s^2).

Tabla 1. Intervalos de consistencia para los tres criterios de consistencia utilizados en el estudio.

Nivel de consistencia	Criterio I Lamm (km/h)	Criterio II Lamm (km/h)	Criterio ICI (km/h)
Bueno	$ V_{85} - V_d \leq 10$	$ V_{85I} - V_{85I+1} \leq 10$	$ICI \leq 10$
Aceptable	$10 < V_{85} - V_d \leq 20$	$10 < V_{85I} - V_{85I+1} \leq 20$	$10 < ICI \leq 20$
Pobre	$ V_{85} - V_d > 20$	$ V_{85I} - V_{85I+1} > 20$	$ICI > 20$

3.1.5. Evaluación de la consistencia

Uno de los parámetros que se han tenido en cuenta en el análisis ha sido el nivel de consistencia de cada una de las curvas. La consistencia se ha evaluado según tres criterios distintos: criterio I y II de Lamm *et al.* (1999) y el criterio inercial propuesto por García *et al.* (2013a).

El criterio I de Lamm *et al.* (1999) se basa en la diferencia entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño. Este criterio permite la identificación de los elementos del trazado cuyo diseño no se ajusta al trazado general de la carretera. Para su empleo en este estudio, ha sido necesario realizar previamente una tramificación de la carretera, con el fin de obtener la velocidad de diseño. Para ello, se ha utilizado el procedimiento desarrollado por García *et al.* (2013b).

El criterio II de Lamm *et al.* (1999) está basado en la reducción de la velocidad de operación entre dos elementos consecutivos. Este criterio indica la sorpresa experimentada por los conductores que les hace disminuir su velocidad, al pasar de un elemento al siguiente.

El criterio inercial desarrollado por García *et al.* (2013a) se basa en la diferencia entre la velocidad de operación inercial al inicio de la curva y la velocidad de operación en ella, definida para un punto como la velocidad de operación media en el kilómetro directamente anterior. A esta diferencia se le ha denominado Índice de Consistencia Inercial (ICI). Este criterio es un indicador de cómo el trazado se ajusta a las expectativas de los conductores.

Los intervalos de consistencia de cada uno de los criterios enunciados se muestran en la Tabla 1.

3.1.6. Caracterización de la señalización y el balizamiento

Para la caracterización de los elementos de señalización y balizamiento, se ha realizado un inventario de estos elementos de cada una de las curvas incluidas en el estudio mediante la herramienta *Street View* de *Google Earth*, incluyendo la distancia entre la localización de éstos y el inicio y el final de la curva.

Los elementos considerados son: señal de advertencia de doble curva; señal de advertencia de curva; señal de recomendación de velocidad 40 km/h, 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h, 80 km/h; panel direccional único; panel direccional doble; panel direccional triple; panel direccional corto; y señal de límite de velocidad 40 km/h, 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h, 80 km/h, 90 km/h, 100 km/h.

3.2. Análisis

En el análisis desarrollado a lo largo de la investigación que se presenta se ha estudiado la relación existente entre cada uno de los parámetros obtenidos en el apartado anterior y el índice de peligrosidad. Sin embargo, a continuación, únicamente se muestra el análisis de la influencia de la señalización y el balizamiento en el índice de peligrosidad, diferenciando entre cada uno de los niveles de consistencia. Estos niveles son los correspondientes al criterio II de Lamm *et al.* (1999), en el que se compara la velocidad de

operación de la curva con la velocidad de operación en la recta anterior, y al criterio inercial desarrollado por García *et al.* (2013a), en el que se compara la velocidad de operación de la curva con la velocidad de operación inercial.

3.2.1. Influencia de la existencia de paneles direccionales según el intervalo del índice de consistencia inercial (ICI)

En este análisis, se ha estudiado la variación del índice de peligrosidad en las curvas con un nivel de consistencia dado, calculado según el ICI, considerando la presencia o no de paneles direccionales.

Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Como puede observarse, en todos los casos, el índice de peligrosidad es considerablemente mayor cuando se dispone de, al menos, un panel direccional anunciando la curva.

En cuanto al porcentaje de curvas sin accidentes, se aprecia que, salvo en el primer intervalo, hay un porcentaje mayor de curvas sin accidentes entre las curvas que no disponen de paneles direccionales. Sin embargo, las diferencias entre los porcentajes de curvas sin accidentes con y sin paneles direccionales son mínimas.

3.2.2. Influencia de la presencia de paneles direccionales según el criterio II de Lamm et al. (1999)

Para este análisis se ha evaluado la variación del índice de peligrosidad en las curvas con un nivel de consistencia dado, calculado según el criterio II de Lamm *et al.* (1999), considerando la presencia o no de paneles direccionales.

Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Los resultados muestran que las curvas en las que no se han instalado paneles direccionales presentan un índice de peligrosidad medio ponderado significativamente menor que aquellas que sí disponen de dichos paneles. La

Tabla 2. Índice de Peligrosidad medio y porcentaje de curvas sin accidentes, según la presencia o no de paneles direccionales, según el nivel de consistencia (ICI).

	Existencia Panel Direccional	IPm	IPm (sin 0)	Nº curvas	Nº curvas sin acc	% curvas sin acc
0 < ICI < 5	NO	0,165	1,083	85	72	84,705
	SI	0,210	1,989	142	127	89,436
5 < ICI < 10	NO	0,117	1,735	59	55	93,220
	SI	0,411	3,855	178	159	89,325
10 < ICI < 15	NO	0,190	1,446	38	33	86,842
	SI	0,483	2,921	151	126	83,443
ICI > 15	NO	0,137	1,276	37	33	89,189
	SI	0,542	2,968	115	94	81,739

Tabla 3. Índice de Peligrosidad medio y porcentaje de curvas sin accidentes, según la presencia o no de paneles direccionales, según el nivel de consistencia (criterio II Lamm).

	Presencia Panel Direccional	IPm	IPm (sin 0)	Nº curvas	Nº curvas sin acc	% curvas sin acc
0 < V85i-V85i+1 < 5	NO	0,117	1,436	208	191	91,826
	SI	0,275	2,214	225	197	87,555
5 < V85i-V85i+1 < 10	NO	0,334	2,611	125	109	87,200
	SI	0,430	3,000	216	185	85,648
10 < V85i-V85i+1 < 15	NO	0,127	1,430	56	51	91,071
	SI	0,332	2,779	117	103	88,034
15 < V85i-V85i+1 < 20	NO	0,054	1,203	22	21	95,454
	SI	0,570	3,424	66	55	83,333
V85i-V85i+1 > 20	NO	0,060	1,023	17	16	94,117
	SI	0,847	5,677	67	57	85,074

diferencia entre el índice de peligrosidad medio ponderado de las curvas con y sin paneles es mayor cuanto mayor es el nivel de consistencia.

Considerando el porcentaje de curvas sin accidentes, se observa que en todos los casos hay un porcentaje mayor de curvas sin accidentes entre las curvas que no disponen de paneles direccionales.

3.2.3. Influencia de la presencia de señales de límite de velocidad según el intervalo del índice de consistencia inercial (ICI)

En este análisis se ha evaluado la variación del índice de peligrosidad en curvas con y sin señales de

limitación de velocidad, para los diferentes intervalos de consistencias, calculados según el criterio basado en el índice de consistencia inercial. En este caso, únicamente se han considerado dos intervalos debido a la escasa muestra existente de curvas con señalización de límite de velocidad.

Los resultados se muestran en la Tabla 4.

En la Tabla 4 se observa que el índice de peligrosidad medio ponderado es mayor en curvas con límite de velocidad cuando el índice de consistencia inercial se encuentra entre 0 y 10, pero es menor cuando ICI es mayor de 10. Estos resultados se obtienen al considerar todas las curvas. Sin embargo, si únicamente se consideran las curvas con accidentes, se observa que el

Tabla 4. Índice de Peligrosidad medio y porcentaje de curvas sin accidentes, según la presencia o no de señales de límite de velocidad, según el nivel de consistencia (ICI).

	Presencia Señal Límite	IPm	IPm (sin 0)	Nº curvas	Nº curvas sin acc	% curvas sin acc
0 < ICI < 10	NO	0,261	2,521	444	398	89,639
	SI	0,386	1,624	21	16	76,190
ICI > 10	NO	0,539	3,226	323	269	83,281
	SI	0,106	1,007	19	17	89,473

Tabla 5. Índice de Peligrosidad medio y porcentaje de curvas sin accidentes, según la presencia o no de señales de límite de velocidad, según el nivel de consistencia (criterio II Lamm).

	Presencia Señal Límite	IPm	IPm (sin 0)	Nº curvas	Nº curvas sin acc	% curvas sin acc
0 < V85i-V85i+1 < 10	NO	0,275	2,463	447	397	88,814
	SI	0,054	0,975	18	17	94,444
V85i-V85i+1 > 10	NO	0,430	2,681	318	267	83,962
	SI	1,644	7,892	24	19	79,166

índice de peligrosidad medio ponderado es mayor cuando no existe límite de velocidad en todos los casos.

En cuanto al porcentaje de curvas sin accidentes, se observa que, en el caso de valores de ICI bajos, este porcentaje es mayor cuando no existe límite de velocidad, y al contrario cuando el valor de ICI es superior a 10.

3.2.4. Influencia de la presencia de señales de límite de velocidad según el criterio II de Lamm et al. (1999)

En el ámbito de este análisis se ha evaluado la variación del índice de peligrosidad en las curvas con un nivel de consistencia dado, calculado según el criterio II de Lamm *et al.* (1999), considerando la presencia o no de señales de límite de velocidad. Al igual que en el caso anterior, únicamente se han considerado dos intervalos de consistencia debido a la escasez de muestra de curvas con señal de límite de velocidad.

Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Los valores obtenidos muestran una notable diferencia entre los dos niveles de consistencia considerados. En el primero de ellos, el índice de pe-

ligrosidad medio ponderado es mayor ante la ausencia de señalización de límite de velocidad, manteniendo esta tendencia cuando no se consideran en el análisis las curvas sin accidentes. En el segundo intervalo de consistencia, los resultados son totalmente opuestos.

Esta tendencia se observa también en lo que a porcentaje de curvas sin accidentes se refiere. En el primer intervalo de consistencia analizado, el porcentaje de curvas sin accidentes es mayor en los casos en los que hay señalización de límite de velocidad, mientras que, en el segundo intervalo, el porcentaje de curvas sin accidentes es mayor donde no se dispone de señales de límite de velocidad.

4. Discusión

Durante el desarrollo de la investigación que se presenta se han llevado a cabo un número considerable de análisis, estudiando cómo influye cada uno de los parámetros mencionados en los valores arrojados por el índice de peligrosidad. Sin embargo, en el presente artículo únicamente se han descrito los correspondientes a la influencia de la presencia de paneles

direccionales y señales de límite de velocidad, por considerarse los más relevantes en este ámbito.

A pesar de que la hipótesis inicial se basaba en que la señalización y el balizamiento en una curva tienen una influencia significativa en la reducción de la siniestralidad, los resultados de los análisis muestran que no siempre se cumple.

Al estudiar la influencia de la existencia de paneles direccionales en el índice de peligrosidad, se observa que, tanto al agrupar las curvas según los niveles de consistencia marcados por Lamm *et al.* (1999) como al agruparlos según el criterio de consistencia propuesto por García *et al.* (2013a), el índice de peligrosidad medio ponderado es en todos los casos mayor en el grupo de curvas en las que se han dispuesto paneles direccionales. La diferencia entre el índice de peligrosidad medio ponderado del grupo de curvas con paneles y el índice del grupo de curvas sin paneles es mayor al aumentar tanto los valores del ICI como las diferencias de velocidad de operación entre elementos consecutivos, siendo máxima en curvas con un alto nivel de inconsistencia. Del mismo modo, se observa que en ambos casos el porcentaje de curvas sin accidentes es mayor en el grupo de curvas con muy buena consistencia con paneles direccionales. Sin embargo, en el grupo de curvas con una consistencia “aceptable” o “pobre”, el porcentaje de curvas sin accidentes es mayor donde no hay paneles direccionales.

Estos resultados pueden ser debidos a que el balizamiento instalado es insuficiente, siendo necesario aumentar el número de paneles. También puede ocurrir que las curvas en cuestión sean potencialmente más peligrosas y que este nivel de peligrosidad no haya podido solventarse completamente con la colocación de paneles direccionales, sino que es necesario llevar a cabo una actuación diferente. Además, puede darse el caso de que las curvas en las que no

hay paneles direccionales sean mucho menos peligrosas, y por eso no se haya contemplado su colocación. Todas estas casuísticas no pueden compararse con los datos disponibles.

En el caso de la señalización de límites de velocidad, en el grupo de curvas con una consistencia “buena” según el criterio del ICI, el índice de peligrosidad medio ponderado es mayor en el subgrupo de curvas con señalización de límite de velocidad, aunque la diferencia con el subgrupo sin señalización es mínima. Sin embargo, en el grupo de curvas con consistencia “aceptable” o “pobre” el índice de peligrosidad medio ponderado es mucho mayor en el subgrupo de curvas sin límite de velocidad. Asimismo, el porcentaje de curvas sin accidentes en el grupo de curvas con “buena” consistencia es mayor donde no hay señal de limitación de velocidad, y en el grupo de curvas con consistencia “aceptable” o “pobre” es mayor donde sí hay señal de límite de velocidad.

Al considerar la evaluación de la consistencia según Lamm *et al.* (1999), en el grupo de curvas con “buena” consistencia el índice de peligrosidad medio ponderado es mayor cuando no hay señalización de velocidad y en el grupo de curvas con consistencia “aceptable” o “mala” es mayor el índice de peligrosidad medio ponderado cuando sí hay límite de velocidad. Estas tendencias se mantienen en el caso de porcentaje de curvas sin accidentes.

Estos dos últimos casos resultan contradictorios, posiblemente por la reducida muestra de curvas con señal de límite de velocidad. Considerando que el criterio inercial de García *et al.* (2013a) se ha desarrollado a partir de datos de carreteras de la provincia de Valencia, se consideran más idóneos los resultados obtenidos en el análisis en el que se ha considerado este criterio de consistencia frente al análisis en el que se ha considerado el criterio de Lamm *et al.* (1999).

Por tanto, según los resultados obtenidos puede concluirse que para

curvas con consistencia “buena” la presencia de señalización de límite de velocidad no tiene una influencia claramente significativa sobre la siniestralidad. Sin embargo, en el caso del grupo de curvas con consistencia “aceptable” o “pobre” la presencia de señalización de límite de velocidad tiene una influencia positiva sobre la siniestralidad, ya que el índice de peligrosidad es mucho mayor en el grupo de curvas en el que no existe limitación de velocidad. Con todo ello, se puede entender que cuando la inconsistencia existe, la señalización de límites de velocidad específicos influye significativamente reduciendo la siniestralidad, llegando incluso a niveles de curvas de consistencia “buena”.

No obstante, esta conclusión no puede darse como válida sin una mayor profundización en el análisis, debido a que se tienen datos de la señalización existente pero no del año de instalación de la señalización. Es probable que un mayor nivel de señalización se corresponda con una mayor tasa de peligrosidad porque la señalización y el balizamiento se hayan instalado como una medida correctora ante una alta ocurrencia de accidentes.

Por tanto, es necesario conocer el momento de instalación de la señalización y el balizamiento y comparar el número de accidentes ocurridos antes y después de esta instalación. De esta forma, sería posible comprobar también si una mala concepción del diseño geométrico de una carretera puede solventarse con la instalación de señalización y balizamiento, verificando así la hipótesis aceptada hasta ahora; o si, por el contrario, las inconsistencias del diseño geométrico prevalecen sobre el aumento del equipamiento viario.

Asimismo, sería posible profundizar en el análisis de la influencia de la señalización y del balizamiento en la siniestralidad llevando a cabo un estudio antes/después, en el que en diferentes curvas sin señalización o sin balizamiento se fueran incorporando distintas combinaciones de

estos elementos. El inconveniente de este estudio es su coste y el hecho de que es necesario disponer datos de, al menos, tres o cinco años de cada uno de los escenarios para que el análisis pueda considerarse válido.

5. Conclusiones

En la investigación presentada se ha analizado la influencia que la presencia de la señalización vertical y el equipamiento tienen en la ocurrencia de accidentes. Concretamente, se ha calculado el índice de peligrosidad medio ponderado para diferentes grupos de curvas, definiéndose como el cociente entre el número total de accidentes con víctimas que se han producido en esas curvas y el volumen total de tráfico de las mismas. La agrupación de las curvas se ha llevado a cabo según su nivel de consistencia, evaluada según dos criterios: el criterio II de Lamm *et al.* (1999) y el criterio inercial propuesto por García *et al.* (2013a). Cada grupo de curvas se ha subdividido en dos subgrupos según la presencia o no de señalización de velocidad límite o de paneles direccionales, dependiendo del estudio realizado.

El análisis se ha realizado sobre una base de datos de 66 tramos de carreteras de la provincia de Valencia, en los que se han identificado y caracterizado 1.354 curvas. En dicha base de datos se han incluido: las características geométricas obtenidas a partir de la restitución de la geometría de los tramos de carretera seleccionados; los datos de accidentes y volumen de tráfico facilitados por la administración competente; el perfil de velocidad de operación de cada una de las transición recta-curva estimado a partir de modelos desarrollados y calibrados en investigaciones anteriores; y la señalización vertical y el balizamiento instalado en cada una de las curvas.

El profundo análisis desarrollado en torno a la influencia de las diferentes variables analizadas y, especialmente, de la presencia de paneles

direccionales y de señalización de límite de velocidad en el índice de peligrosidad medio ponderado de los grupos de curvas descritos, ha arrojado interesantes conclusiones.

En cuanto a la presencia de paneles direccionales, se ha comprobado que en los grupos de curvas con este balizamiento el índice de peligrosidad medio ponderado es mayor, para cualquier nivel de consistencia, aumentando considerablemente en el caso de curvas con peor nivel de consistencia. Este hecho puede sugerir que añadir múltiples paneles direccionales no mejora el índice de peligrosidad.

En el caso de la instalación de señalización de límite de velocidad, se concluye que para curvas con consistencia “buena” la presencia de señalización de límite de velocidad no tiene una influencia claramente significativa sobre la siniestralidad. Sin embargo, la limitación de velocidad parece tener una influencia positiva sobre la siniestralidad en curvas con una consistencia “aceptable” o “pobre”.

A pesar de que el estudio realizado precisa, como se ha comentado en el apartado de discusión, una mayor profundidad para obtener resultados concluyentes, este análisis puede sentar las bases para un empleo más eficiente de la señalización y el balizamiento. Asimismo, sus resultados resaltan la importancia de un buen diseño geométrico de las carreteras frente a la excesiva señalización de carreteras mal diseñadas.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Conselleria de Infraestructuras, Transporte y Medio Ambiente de la Generalitat Valenciana, y al Área de Carreteras de la Diputación de Valencia por el apoyo prestado en la recogida de datos y en la información proporcionada.

Asimismo, quieren destacar que la toma de datos continuos de velocidad se llevó a cabo dentro del proyecto REVEL – Una Metodología para la Revisión de los Límites de Velocidad, cuyo

número de referencia es PT-2006-031-25 IAPP, gracias a la subvención parcial recibida del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Ministerio de Fomento).

6. Bibliografía

[1] AWATA, M. y HASSAN, Y. (2002). “Towards establishing an overall safety-based geometric design consistency measure”. 4th Transportation Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering.

[2] CAMACHO-TORREGROSA, F.J., PÉREZ-ZURIAGA, A.M., CAMPOY-UNGRÍA, J.M. y GARCÍA, A. (2013). “New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation”. Accident analysis and Prevention, 61C, pp. 33-42.

[3] CAMACHO-TORREGROSA, F.J., PÉREZ-ZURIAGA, A.M., LÓPEZ-PORTA, E.M. y GARCÍA, A. (2014). “Restitución geométrica en planta de carreteras mediante el empleo de métodos analíticos basados en el azimut”. XI Congreso de Ingeniería del Transporte.

[4] CHARLTON, S.G. (2004). “Perceptual and attentional effects on drivers’ speed selection at curves”. Accident Analysis and Prevention, 36, pp. 877–884.

[5] CHARLTON, S.G. (2007). “The role of attention in horizontal curves: A comparison of advance warning, delineation, and road marking treatments”. Accident Analysis and Prevention, 39, pp. 873–885.

[6] GARCÍA, A., LLOPIS-CASTELLÓ, D., CAMACHO-TORREGROSA, F.J. y PÉREZ-ZURIAGA, A.M. (2013a). “New consistency index based on inertial operating speed”. Transportation Research Record, 2391, pp. 3-14.

[7] GARCÍA, A., LLOPIS-CASTELLÓ, D., PÉREZ-ZURIAGA, A.M. y CAMACHO-TORREGROSA, F.J. (2013b). “Homogeneous road segment identification based on inertial

operating speed”. Transportation Research Board (TRB) 92nd Annual Meeting.

[8] LAMM, R., CHOUERI, E. M. y MAILAENDER, T. (1992). “Traffic safety on two continents – A ten year analysis of human and vehicular involvements”. Proceedings of the Strategic Highway Research Program (SHRP) and Traffic Safety on Two Continents, pp. 18–20.

[9] LAMM, R., PSARIANOS, B. y MAILAENDER, T. (1999). “Highway design and traffic safety engineering handbook”. McGraw-Hill Companies, Inc.

[10] LAMM, R., ZUMKELLER, K. y BECK, A. (2000). “Traffic safety – The relative effectiveness of a variety of road markings and traffic control devices”. International Conference: Road Safety on Three Continents, CSIR, TRB, VTI, BAST. Pretoria, South Africa.

[11] NG, J. C. W. y SAYED, T. (2004). “Effect of geometric design consistency on road safety”. Canadian Journal of Civil Engineering 31 (2), pp. 218-227.

[12] PÉREZ-ZURIAGA, A.M., GARCÍA GARCÍA, A., CAMACHO-TORREGROSA, F.J. y D’ATTOMA, P. (2010). “Modeling operating speed and deceleration on two-lane rural roads with global positioning system data”. Transportation Research Record, 2171, pp. 11-20.

[13] POLUS, A. y MATTAR-HABIB, C. (2004). “New consistency model for rural highways and its relationship to safety”. Journal of Transportation Engineering, 130(3), pp.286-293.

[14] TREAT, J.R, TUMBAS, N.S., MCDONALD, S.T., SHINAR, D., HUME, R.D., MAYER, R.E., STANSIFER, R.L. y CASTELLAN, N.J. (1979). “Tri-level study of the causes of traffic accidents: Final report – Executive summary. Bloomington”. Institute for Research in Public Safety. [REPORT No. DOT-HS-034-3-535-79-TAC(S)]. ❖