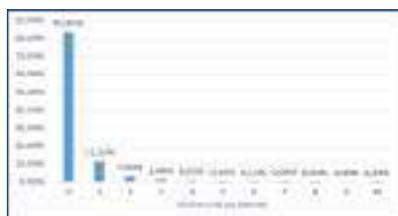


Calibración de la velocidad de operación inercial como medida sustitutiva de las expectativas de los conductores



Calibration of the inertial operating speed as a surrogate measure of drivers' expectancies

David Llopis Castelló

Investigador Postdoctoral

*Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC)
Universitat Politècnica de València*

Francisco Javier Camacho Torregrosa

Profesor Contratado Doctor

GIIC – Universitat Politècnica de València

Alfredo García

Catedrático

GIIC – Universitat Politècnica de València

Los factores más importantes en la producción de un accidente de tráfico son la infraestructura, el vehículo y el factor humano. De hecho, la interacción entre la infraestructura y el factor humano ha sido profundamente estudiada a través del concepto de consistencia del diseño geométrico, que puede definirse como el grado de adecuación entre las expectativas de los conductores y el comportamiento que facilita la carretera.

Recientemente, se han desarrollado distintos modelos de consistencia con el fin de determinar el nivel de seguridad vial de un segmento homogéneo de carretera o elemento de la misma, pero ninguno de ellos incorpora en su formulación la definición básica de consistencia.

Así, el objetivo principal de este estudio es la calibración de la velocidad de operación inercial, que se presenta como una medida sustitutiva de las expectativas de los conductores.

Mientras que la velocidad de operación representa la velocidad en cada punto del trazado de la carretera, la velocidad de operación inercial trata de representar en cada punto el efecto de las velocidades desarrolladas previamente por los conductores a lo largo de una determinada distancia ya recorrida. Este efecto trata de describir el procedimiento de adquisición de expectativas de los conductores, que está estrechamente relacionado con la memoria a corto plazo de las personas.

Como resultado, la velocidad de operación inercial que mejor representa las expectativas de los conductores es aquella estimada como la velocidad de operación media ponderada de los últimos 15 segundos recorridos teniendo en cuenta una distribución lineal de los pesos. Esta nueva definición permite desarrollar nuevos modelos de consistencia que representen mejor el fenómeno subyacente y, como consecuencia, evaluar de manera más precisa la seguridad vial.

The most important factors on road crash occurrence are: infrastructure, vehicle, and human. In fact, the interaction between the infrastructure and human factors has been thoroughly studied from the concept of geometric design consistency. This concept can be defined as how drivers' expectancies and road behavior relate.

Recently, some consistency models have been developed to determine road safety on a homogeneous road segment or at a certain road element. However, none of these models are based on the fundamental notion of consistency.

Hence, the main objective of this study is the calibration of the inertial operating speed, which is proposed as a surrogate measure of drivers' expectancies.

While the operating speed represents the speed at each station of the alignment – which mainly depends

on road geometry – the inertial operating speed represents the effect of the previous road section on drivers' behavior. This effect aims to describe the drivers' expectancies acquirement process which is closely related to Short Term Memory.

As a conclusion, the inertial operating speed that better represents drivers' expectancies was estimated as the weighted average operating speed of the preceding 15 seconds, considering a linear weighting distribution. This new definition allows at developing new consistency models that better represent the underlying phenomenon and, consequently, assessing road safety more accurately.

1. INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud, en su informe sobre la situación mundial de la seguridad vial, todos los años fallecen más de 1,2 millones de personas como consecuencia de accidentes de tráfico en todo el mundo y otros 50 millones resultan heridas. Esto conlleva a que sea una de las principales causas de pérdidas humanas en todo el mundo, siendo la primera causa de muerte para el grupo de edad comprendido entre los 15 y los 29 años (WHO, 2015).

En España se produjeron un total de 1.291 víctimas mortales durante el año 2016 en vías interurbanas, de las que más del 70 % sucedieron en carretera convencional (DGT, 2017). A pesar de que la tendencia de fallecidos en vías interurbanas ha sido decreciente desde principios de siglo, el número de víctimas mortales en carretera convencional se ha visto incrementado en los últimos años. Además, este tipo de vía representa alrededor del 90 % de la red de carreteras de nuestro país, lo que hace que las carreteras convencionales cobren un papel muy importante en lo que se refiere a su potencial de mejora de la seguridad vial.

Entre los diferentes factores que están presentes en la producción de un accidente de tráfico cabe destacar tres: el humano, el vehículo y la infraestructura. Particularmente, el factor infraestructura está presente en más del 30 % de los accidentes ocurridos en carretera. De hecho, los accidentes tienden a concentrarse en ciertos elementos de la carretera.

Por ello, el factor infraestructura y su interacción con el factor humano, que está presente en alrededor del 90 % de los accidentes, han sido estudiados profundamente en los últimos años a partir del concepto de consistencia del diseño geométrico de carreteras, que se define como el grado de adecuación entre las expectativas de los conductores y el comportamiento de la carretera.

El objetivo de la consistencia del diseño geométrico de carreteras es garantizar que sus usuarios no se vean sorprendidos a lo largo de la misma, es decir, se trata de conseguir que los conductores se encuentren a lo largo de la carretera con lo que ellos se esperan a partir de sus expectativas. En este sentido, un diseño consistente asegura que elementos geométricos sucesivos actúen de forma coordinada produciendo una conducción armoniosa

libre de sorpresas. Por el contrario, un diseño inconsistente puede producir sorpresas en los conductores, lo que se traduce en la ejecución de maniobras erráticas o conflictivas aumentando la probabilidad de ocurrencia de accidentes.

La Instrucción de diseño de carreteras española tiene como objetivo el diseño geométrico de carreteras para un determinado flujo de tráfico bajo unas condiciones mínimas de accesibilidad, movilidad, comodidad y seguridad (Fomento, 2016). De esta forma, los diseñadores actuales de carreteras se centran en determinar una geometría del trazado que, de acuerdo a la normativa específica (que debería asegurar un nivel mínimo de seguridad y comodidad), posibilite dicho flujo de tráfico. Sin embargo, seguir la normativa o aplicar métodos tradicionales de diseño puede no asegurar un nivel mínimo de seguridad y comodidad, fundamentalmente porque existen ciertos aspectos que la Instrucción no contempla o controla y para los cuales se necesita de estudios más detallados.

La mayoría de las normativas de carreteras se basan en la velocidad de diseño para determinar los parámetros mínimos de los elementos del trazado, recomendando utilizar

valores superiores a los mínimos siempre que sea posible. Así, a la hora de diseñar las carreteras se suele huir de dichos valores mínimos, pero no existe un criterio de qué valores adoptar. Esto ocasiona generalmente que actúen como factores de decisión únicamente la orografía, la integración ambiental o un menor coste de la carretera, fijando las características finales del diseño geométrico.

Estas deficiencias presentes en la Instrucción pueden ser un factor determinante en la localización de los accidentes, produciéndose una concentración de los mismos en determinadas configuraciones del trazado de la vía, debido en muchas ocasiones a una incoherencia entre un elemento de la vía y su comportamiento general.

Para identificar y evitar estas incoherencias se han desarrollado diferentes modelos de consistencia del diseño geométrico, que se basan fundamentalmente en el análisis del perfil de velocidad de operación (Gibreel et al., 1999). Esta velocidad se define como la velocidad a la cual los usuarios de la vía pueden conducir sus vehículos bajo condiciones de flujo libre y condiciones favorables de meteorología y sin exceder la velocidad segura en ningún momento. En la práctica, la velocidad de operación se asocia al percentil 85 de la velocidad (V_{85}) a la que operan los vehículos ligeros en condiciones de flujo libre. La principal ventaja del uso de estos métodos es que la velocidad de operación se puede estimar a partir de modelos de predicción de la velocidad.

Existen dos tipos de modelos de consistencia: locales y globales. Los criterios locales se basan en el análisis de la consistencia de un elemento aislado del trazado a partir de las deceleraciones que se producen entre elementos sucesivos o la diferencia entre la velocidad de operación y la de diseño (Lamm et

al., 1988). Este tipo de modelos son ideales para detectar en qué elementos del trazado es más probable que ocurran los accidentes. Por otro lado, los criterios globales tratan de evaluar la consistencia de un tramo completo empleando diferentes variables obtenidas a partir del perfil continuo de velocidad de operación asociado (Polus y Mattar-Habib, 2004; Garach et al., 2014; Camacho-Torregrosa, 2015). A pesar de que estos modelos no indican dónde se producirán los accidentes, permiten estimar el número de accidentes en un segmento homogéneo de carretera a partir de una *Función de Estimación de la Siniestralidad (Safety Performance Function, SPF)*.

Sin embargo, estos modelos de consistencia no son capaces de representar adecuadamente el fenómeno estudiado, ya que ninguno de ellos incorpora una variable capaz de representar y cuantificar las expectativas de los conductores. En este sentido, la consistencia de un determinado elemento del trazado no depende únicamente de las características de este elemento y su anterior, sino también de las características de varios elementos anteriores a este. Además, los modelos globales de consistencia están basados en variables que describen de forma general el comportamiento de un segmento de carretera homogéneo, tales como la velocidad o la tasa de deceleración medias, por lo que no son capaces de expresar adecuadamente las expectativas de los conductores.

Para resolver estas deficiencias, García et al. (2013) desarrollaron el Índice de Consistencia Inercial (ICI). Este criterio de consistencia local se definió como la diferencia entre la velocidad de operación inercial (V_i), que trata de representar las expectativas de los conductores, y la velocidad de operación (V_{85}), que responde al comportamiento del diseño geométrico de la carretera en cada punto del trazado. De esta

forma, a mayor diferencia entre ambas velocidades, menos se ajustará el trazado de la carretera a las expectativas de los conductores y, por tanto, mayor será la probabilidad de ocurrencia de accidentes.

García et al. (2013) propusieron que la velocidad de operación inercial fuese calculada en cada punto del trazado como la velocidad de operación media del último kilómetro de carretera recorrido. No obstante, desde un punto de vista psicológico, el proceso de generación de expectativas de los conductores está estrechamente ligado a la memoria a corto plazo, la cual es decadente con el tiempo (Revlin, 2012). Esto significa que los conductores recuerdan con mayor claridad aquello que recorren en última instancia y, por tanto, sus expectativas dependen del tiempo transcurrido.

Por tanto, una velocidad de operación inercial definida como la velocidad de operación media ponderada basada en tiempo permitiría estimar con una mayor precisión las expectativas de los conductores que estimando dicha velocidad como una simple media en base a una determinada distancia, ya que dados distintos segmentos de carretera con diferentes velocidades de operación medias recorrer una determinada distancia conlleva distintos intervalos de tiempo.

Así, esta investigación trata de mejorar la estimación de la velocidad de operación inercial con el fin de representar de una manera más precisa el proceso de adquisición de expectativas de los conductores.

2. OBJETIVO E HIPÓTESIS

El principal objetivo de esta investigación es la modelización del proceso de adquisición de expectativas de los conductores a través de la velocidad de operación inercial. Para ello, se propone el estudio de distintos periodos de tiempo, longitudes y distribuciones de pesos con

Tabla 1. Características de los segmentos de carretera homogéneos

Variable geométrica	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar
Radio (m)	9,15	998,59	174,51	172,59
Longitud (m)	10	617	85,84	60,03
Ángulo de deflexión (gon)	2,24	259,92	39,58	32,47
CCR (gon/km)	36,57	5.227,45	592,55	538,71
*Curvature Change Rate (CCR) = Ángulo de deflexión (gon) / Longitud (km)				

el fin de identificar qué perfil de velocidad de operación inercial representa mejor el fenómeno estudiado.

Este estudio se fundamenta principalmente en dos hipótesis, que derivan de la conexión existente entre el proceso de adquisición de expectativas de los conductores y la memoria a corto plazo. Desde un punto de visto psicológico, una persona recuerda con mayor claridad aquello que recorre en última instancia y, además, su memoria tiene carácter temporal. Así, la primera hipótesis subyace en que la aplicación de una distribución de pesos en el cálculo de la velocidad de operación inercial será capaz de representar de una forma más precisa el comportamiento de la memoria a corto plazo de las personas. Asimismo, un perfil de velocidad de operación inercial basado en tiempo permitirá obtener mejores resultados que un perfil basado en distancia, ya que tramos de carretera con distintas velocidades de operación media implican diferentes intervalos de tiempo para recorrer una misma distancia.

3. METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología de esta investigación se basa en el análisis de la relación entre la siniestralidad y el Índice de Consistencia Inercial (ICI), definido como la diferencia entre la velocidad de operación inercial (V_i) y la velocidad de operación (V_{85}).

El primer paso del presente estudio fue la selección de los tramos de carretera de estudio. Posteriormente, se obtuvieron los datos de tráfico y siniestralidad de cada uno de los tramos y se restituyó su geometría a partir de la metodología propuesta por Camacho-Torregrosa et al. (2015), que utiliza un algoritmo basado en la variación del azimut. Los perfiles de velocidad de operación fueron estimados considerando los modelos de velocidad desarrollados por Pérez-Zuriaga (2012), ya que los tramos empleados en esta investigación presentaban las mismas características que los empleados para el desarrollo de estos modelos y, además, estaban localizados en la misma área geográfica. A partir de estos perfiles de velocidad, se calcularon diferentes perfiles de velocidad de operación inercial considerando diferentes distancias, periodos de tiempo y distribuciones de pesos. Finalmente, se estudió la relación entre los accidentes y la consistencia a través de la calibración de Funciones de Estimación de la Siniestralidad basadas en el ICI. Como resultado, se identificó el perfil de velocidad de operación inercial que mejor representa las expectativas de los conductores.

3.1. Segmentos de Carretera de Estudio

En este estudio se emplearon un total de 98 secciones de carretera convencional ubicados en la Comunidad Valenciana. Esto supuso

la restitución geométrica de más de 650 km de carretera resultando en un total de 3.229 curvas.

La Tabla 1 muestra las principales características geométricas de estas curvas. En cuanto a sección transversal, los tramos de carretera seleccionados presentaron anchos de carril entre 3,00 y 3,50 m, y ancho de arcén entre 0,50 y 1,50 m. Además, cabe señalar que la pendiente longitudinal no excedía del 5 %.

3.2. Tráfico y Accidentes

El volumen de tráfico y los datos de siniestralidad fueron proporcionados por la Conselleria de Vivenda, Obras Públicas y Vertebración del Territorio de la Generalitat Valenciana y por la sección de carreteras de la Diputación de Valencia. De esta forma, se identificaron la Intensidad Media Diaria (IMD) de tráfico y el número de accidentes con víctimas para cada curva de estudio.

La IMD se estimó a partir del volumen de tráfico medio entre 2002 y 2011. En este sentido, las curvas presentaron una IMD entre 465 y 10.817 vpd. Adicionalmente, se estudió la variabilidad del tráfico a través del análisis del coeficiente de variación (CV). Como resultado, el valor medio del CV y su desviación estándar fueron del 21 % y 10 %, respectivamente. Por tanto, la variación del tráfico a lo largo de los años estudiados puede considerarse baja.

Por otro lado, solo se consideraron los accidentes con víctimas ocurridos durante el mismo periodo de tiempo. Para cada uno de los accidentes ocurridos, se analizaron las causas del mismo de manera que solo se tuvieron en cuenta aquellos relacionados con la propia geometría del trazado. Por ejemplo, los accidentes causados por la entrada de un vehículo a la vía principal o por el atropello a animales no fueron considerados. Como resultado, un total de 839 accidentes fueron utilizados en esta investigación.

Tabla 2. Modelos de velocidad (Pérez-Zuriaga, 2012)

Tipo de elemento		Ecuación
Curva		$V_{85,C} = 106.863 - 60.1185/e^{0.00422598 \cdot R}$
Recta	$L \geq 700 \text{ m}$	$V_{85,T} = \sqrt{-1464.72 + 351.288 \cdot \sqrt{L}}$
	$L < 700 \text{ m} \text{ \& } R_1 \leq 600 \text{ m}$	$V_{85,T} = 0.362739 \cdot V_{85,C1} + 59.6982/e^{-0.0000472302 \cdot GM}$
	$L < 700 \text{ m} \text{ \& } R_1 > 600 \text{ m}$	$V_{85,T} = \sqrt{7.399.27 + 3.03956 \cdot L}$
Tasa de aceleración		$a_{85} = 1/(-1.49325 + 0.548458 \cdot \ln(R))$
Tasa de deceleración		$d_{85} = \sqrt{-0.0652071 + 201.174/R}$

donde $V_{85,C}$ es la velocidad de operación en curva (km/h); $V_{85,T}$ la velocidad de operación en recta (km/h); a_{85} la tasa de aceleración (m/s^2); d_{85} la tasa de deceleración (m/s^2); $V_{85,C1}$ la velocidad de operación de la curva precedente (km/h); R el radio de la curva (m); R_1 el radio de la curva precedente (m); R_2 el radio de la curva sucesiva (m); L la longitud de la recta (m); y GM el siguiente índice geométrico (m^2):

$$GM = \frac{L \cdot (R_1 \cdot R_2)^{0.5}}{100}$$

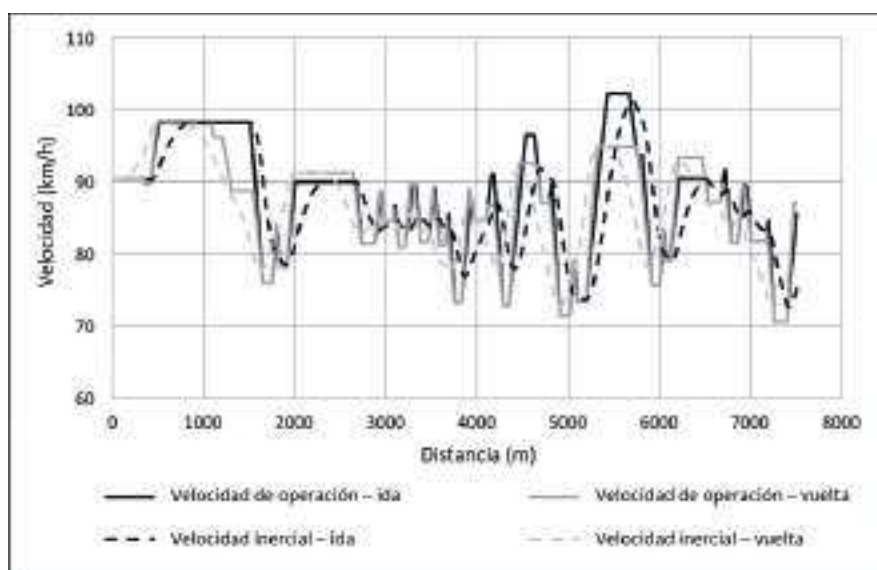


Figura 1. Perfiles de velocidad.

3.3. Perfil de Velocidad de Operación

El perfil de velocidad de operación de cada segmento de carretera fue estimado utilizando los modelos de velocidad propuestos por Pérez-Zuriaga (2012), que fueron desarrollados a partir de datos de velocidad observados en carreteras ubicadas en la misma área geográfica y con las mismas características

que los tramos de carretera empalados en este estudio (Tabla 2). Como resultado, se obtuvo la velocidad de operación metro a metro (Figura 1).

3.4. Perfil de Velocidad de Operación Inercial

La velocidad de operación inercial (V_i) trata de representar las expectativas de los conductores, que están estrechamente relacionadas

con la memoria a corto plazo. Esta memoria depende del tiempo y, además, se va actualizando a medida que transcurre el mismo (Revlin, 2012). De esta manera, los conductores recuerdan mejor aquello que han visualizado en última instancia.

Por tanto, se propone que la velocidad de operación inercial sea calculada en cada punto del trazado como la media ponderada de las velocidades de operación desarrolladas en un determinado tiempo t o una longitud L anterior a ese punto, considerando una determinada distribución de pesos, que trata de representar cómo la mente humana gestiona la información visual:

$$V_{i,k} = \frac{\sum w_j \cdot V_{85,j}}{\sum w_j} \quad (1)$$

donde $V_{i,k}$ es la velocidad de operación inercial en el punto k ; w_j es el valor del peso en el intervalo j ; y $V_{85,j}$ es el valor de la velocidad de operación en el intervalo j .

Esta investigación estudia tiempos comprendidos entre 10 y 40 segundos con un paso de 5 segundos, longitudes comprendidas entre 300

y 800 metros con un paso de 100 metros y 11 distribuciones de pesos basadas en la forma funcional de una parábola (ax^2+bx+c).

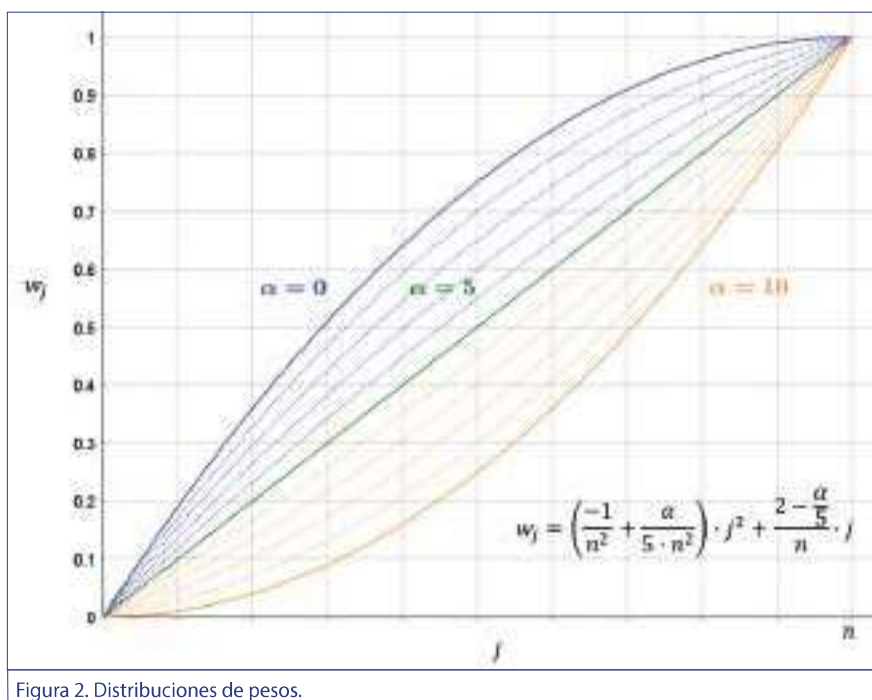
Estas distribuciones pueden tomar valores entre 0 y 1, incrementando como el punto kilométrico j está más cerca de la sección crítica k , con las siguientes restricciones:

- $w_j = 0$ para el primer punto kilométrico j considerado en el cálculo. Este punto define el umbral entre la zona que no se incluye en el cálculo por no tener influencia en el comportamiento del conductor y la zona considerada.
- $w_j = 1$ para $j = k$. Esto significa que el punto kilométrico donde se encuentra el conductor en un momento específico es el que más importancia posee para la formación de sus expectativas.

Los parámetros a , b y c de las distribuciones quedan definidos en función del valor α de la distribución de pesos, que puede variar entre 0 y 10, y el número n de intervalos considerados en el cálculo (Figura 2). En caso de que la velocidad de operación inercial fuese calculada a partir de una distancia (L), n era igual a L en metros, es decir, el cálculo se realizaba metro a metro. Sin embargo, si esta velocidad era basada en tiempo, n era igual a 10 veces el tiempo considerado en segundos, es decir, la velocidad de operación inercial era calculada considerando intervalos de 0,1 s.

El parámetro α determina la concavidad o convexidad de la distribución. En este sentido, un valor de α igual a 0 se traduce en una distribución parabólica convexa con derivada igual a 0 cuando el valor del peso es 1 ($j = k$), mientras que un valor de α igual a 10 conlleva una distribución cóncava con derivada igual a 0 cuando el valor del peso es 0 ($j = 0$). De la misma forma, cuando el valor de α es igual a 5 se dispone de una distribución lineal de los pesos.

Como resultado, se obtuvieron 143 perfiles de velocidad de opera-



ción inercial ((7 tiempos + 6 longitudes) x 11 distribuciones de pesos) para cada sección de carretera. La Figura 1 muestra el perfil de velocidad de operación y su correspondiente perfil de velocidad de operación inercial considerando 15 s y una distribución lineal de los pesos ($\alpha = 5$) para uno de las secciones de carretera estudiadas.

4. RESULTADOS

El análisis de la velocidad de operación inercial se ha llevado a cabo a partir del estudio de la rela-

ción entre la siniestralidad y el Índice de Consistencia Inercial, que se define como la diferencia entre la velocidad de operación inercial (V_i) y la velocidad de operación (V_{85}) en cada curva de estudio (García et al., 2013).

Debido a que se disponía de 143 perfiles de velocidad de operación inercial, para cada una de las curvas de estudio se obtuvo el mismo número de ICIs, que fueron calculados como la media entre los ICIs obtenidos para ambos sentidos de circulación.

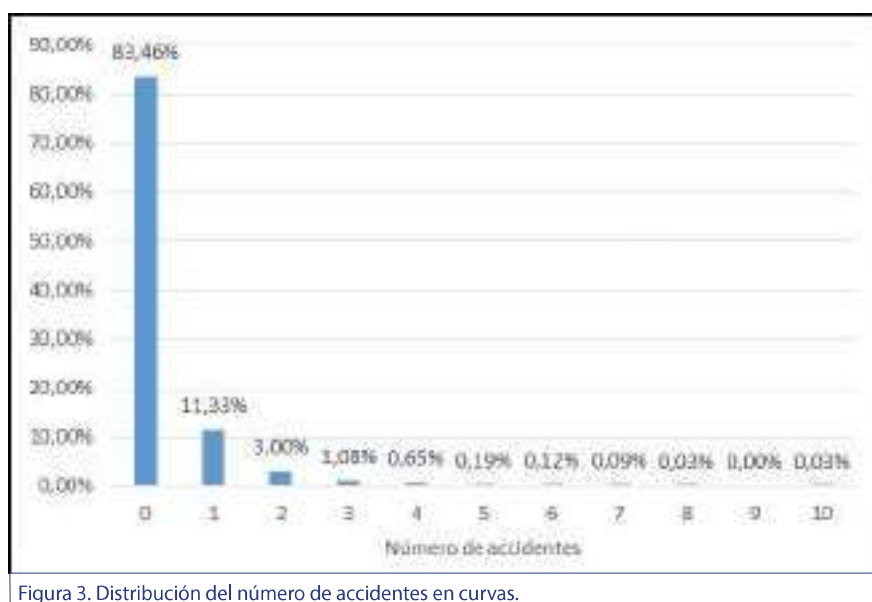


Tabla 3. Modelos con mejor ajuste

Modelo	DIC	RMSE	MAE	ASD
$L_{500,8}$	3.290	0,6433	0,3462	9,8425
$t_{15,9}$	3.287	0,6442	0,3451	19,5314
$t_{15,5}$	3.290	0,6450	0,3439	0,5352
$L_{300,3}$	3.287	0,6480	0,3432	1,6289
$t_{15,8}$	3.294	0,6444	0,3376	42,1625
$t_{20,10}$	3.298	0,6442	0,3431	5,8023
$t_{20,9}$	3.298	0,6437	0,3403	25,7869
$t_{15,3}$	3.297	0,6455	0,3435	2,8378
$t_{10,2}$	3.294	0,6467	0,3395	24,4064
$t_{15,10}$	3.299	0,6440	0,3379	32,1703
$t_{30,7}$	3.299	0,6426	0,3474	13,4363
$t_{10,8}$	3.299	0,6452	0,3394	17,7958
$t_{20,8}$	3.288	0,6447	0,3504	48,6337
$L_{500,9}$	3.281	0,6450	0,3512	52,1987
$t_{10,1}$	3.293	0,6477	0,3489	42,1020
$L_{500,10}$	3.293	0,6457	0,3502	50,2893
$L_{300,4}$	3.300	0,6477	0,3401	33,6636
$t_{10,7}$	3.299	0,6460	0,3475	36,0618
$t_{20,3}$	3.297	0,6449	0,3510	51,1946
$t_{25,9}$	3.281	0,6475	0,3562	86,8078
$t_{10,0}$	3.297	0,6479	0,3491	44,3592
$t_{15,6}$	3.285	0,6493	0,3550	102,9912
$t_{20,2}$	3.295	0,6480	0,3601	114,9137
$L_{300,1}$	3.298	0,6503	0,3530	67,6350
$t_{25,6}$	3.292	0,6575	0,3622	140,0967

Así pues, se calibraron un total de 143 *Funciones de Estimación de la Siniestralidad (Safety Performance Functions, SPFs)*. Teniendo en cuenta que el parámetro de consistencia era el ICI, la forma funcional de la SPF fue definida por la siguiente expresión (Lord y Mannering, 2010):

$$Y_{i,10} = e^{\beta_0} \cdot L^{\beta_1} \cdot IMD^{\beta_2} \cdot e^{\beta_3 \cdot ICI} \quad (2)$$

donde $Y_{i,10}$ son los accidentes con víctima estimados en una determinada curva en 10 años; L la longitud de la curva (km); IMD la intensidad media diaria de tráfico (vh/día); e ICI el parámetro de consistencia inercial (km/h).

Para el ajuste de estas funciones se asumió una distribución Binomial Negativa-Exponencial Generalizada (NB-GE), ya que es una buena solución cuando se trabaja

con datos discretos que presentan sobredispersión y una cantidad importante de ceros (Vangala et al., 2015). En este sentido, de las 3.229 curvas consideradas para el desarrollo de esta investigación, un total de 2.695 presentaron 0 accidentes, lo que significó más del 80 % de las mismas (Figura 3).

El *DIC (Deviance Information Criterion)* fue obtenido para todas las funciones ajustadas como parámetro de bondad de ajuste, de manera que cuanto menor era su valor, mejor era el modelo ajustado. Adicionalmente, se calcularon los parámetros *MAD (Mean Absolute Deviation)*, *MSE (Mean Square Error)* y *ASD (Absolute value of the sum of deviations)*. Al igual que el *DIC*, un menor valor de cualquiera de estos parámetros significaba un modelo más preciso.

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|^2 \quad (4)$$

$$ASD = \left| \sum_{i=1}^n \hat{y}_i - y_i \right| \quad (5)$$

donde n es el número de curvas estudiadas; $\hat{y}_i$ el número de accidentes observados en la curva i ; e y_i es el número de accidentes estimados en la curva i .

La Tabla 3 muestra los mejores 25 modelos calibrados. El nombre del modelo (X_{ij}) indica cómo el perfil de velocidad de operación inercial fue estimado. Si la velocidad era basada en distancia X era L , mientras que X era t si el perfil era estimado basado en tiempo. Asimismo, i indica la distancia en metros o el periodo de tiempo en segundos y j el valor α de la distribución de pesos.

De esta forma, se identificó que un perfil de velocidad de operación inercial basado en tiempo era capaz de representar mejor las expectati-

vas de los conductores que un perfil basado en distancia, ya que la mayoría de los modelos con un mejor ajuste dependían de un cierto periodo de tiempo (Tabla 3). Esto pone de manifiesto que las expectativas de los conductores son creadas en un intervalo de tiempo determinado y que la distancia recorrida durante dicho intervalo puede ser muy distinta en función de la velocidad que lleve el conductor. Por tanto, es preferible estimar el perfil de velocidad de operación inercial en función del tiempo que de una determinada longitud de tramo anterior.

Relacionado con ello, los mejores resultados fueron obtenidos considerando un intervalo de tiempo en el cálculo de la velocidad de operación inercial igual a 15 segundos.

Finalmente, se analizó el efecto de la aplicación de distribuciones de pesos en el cálculo de dicha velocidad. Como conclusión, los modelos más precisos presentaron distribuciones de pesos con valores de α entre 5 y 10, lo que sugiere que los conductores están mucho más influenciados por aquello que recorren en última instancia. En este sentido, es preferible el uso de una distribución lineal de los pesos ($\alpha = 5$), ya que facilita sustancialmente la aplicación práctica de esta investigación.

Así pues, se propone estimar la velocidad de operación inercial en cada punto del trazado como la velocidad de operación media ponderada de los últimos 15 segundos recorridos considerando una distribución lineal de los pesos.

5. DISCUSIÓN

La velocidad de operación inercial (V_i) se ha definido como medida sustitutoria de las expectativas ad hoc de los conductores. Estas expectativas son creadas en cada conductor a medida que recorren un determinado tramo de carretera, por lo que la memoria a corto plazo

tiene un papel fundamental en este proceso. Según Revlin (2012), esta memoria depende del tiempo y es rápidamente decadente.

Las investigaciones desarrolladas anteriormente definen la velocidad de operación inercial en cada punto del trazado como la velocidad de operación media desarrollada en una determinada longitud anterior a dicho punto (García et al., 2013; Montella e Imbriani, 2015).

No obstante, cuando la velocidad media de un tramo es significativamente diferente a la velocidad media de otro tramo, recorrer una determinada longitud de carretera conlleva diferentes tiempos transcurridos. Esta es la principal debilidad de estas estimaciones, puesto que se dan casos en los que la velocidad de operación inercial está siendo calculada con longitudes excesivas (tramos con velocidades medias bajas) y casos en los que esta longitud es insuficiente (tramos con velocidades medias altas).

Por ejemplo, dados dos tramos de carretera con una velocidad media de 70 y 90 km/h, la longitud asociada a un tiempo de 18 segundos son 350 y 450 metros, respectivamente. No obstante, la velocidad raramente permanece constante a lo largo de un tramo de carretera de esta longitud.

Otra de las debilidades encontradas en investigaciones previas fue la consideración de calcular la velocidad de operación inercial como la media aritmética de la velocidad de operación. De esta forma, las velocidades desarrolladas en última instancia tienen la misma importancia que aquellas desarrolladas al inicio del segmento considerado. Sin embargo, multitud de estudios acerca de la memoria a corto plazo destacan que las personas son capaces de recordar mejor aquello que acaban de vivir. Dicho de otro modo, una persona recuerda mejor lo que acaba de ocurrir hace un segundo que lo que ha ocurrido hace 15 segundos.

Por ello, en esta investigación se decidió analizar el perfil de velocidad de operación inercial bajo diferentes tiempos y longitudes de cálculo, así como diferentes distribuciones de pesos que caracterizan el comportamiento decadente de la memoria a corto plazo de las personas. De esta manera, la velocidad de operación inercial era estimada en cada punto del trazado como la velocidad de operación media ponderada.

Los resultados obtenidos mostraron que las expectativas de los conductores eran estimadas de una manera más precisa en función del tiempo que en función de una determinada longitud de tramo anterior. En este sentido, el tiempo que presentó un mejor ajuste fue 15 segundos, el cual está acorde a los resultados obtenidos por diferentes estudios psicológicos (Revlin, 2012).

Por otra parte, también se identificó que determinar la velocidad de operación inercial como la media ponderada ofrecía mejores resultados que calcularla a partir de la media aritmética. La distribución de pesos propuesta para el cálculo de esta velocidad fue la distribución lineal, otorgando un peso igual a 0 a aquella velocidad de operación desarrollada 15 segundos antes y un peso igual a 1 a aquella velocidad de operación desarrollada inmediatamente anterior a un determinado punto de la carretera.

Por tanto, el perfil de velocidad de operación inercial responde adecuadamente al comportamiento de la mente de los conductores y, como consecuencia, es capaz de representar de manera precisa las expectativas ad hoc de los conductores.

6. CONCLUSIONES

Esta investigación se centra en la calibración de la velocidad de operación inercial como medida sustitutoria de las expectativas de los conductores, las cuales están estre-

chamente relacionadas con la memoria a corto plazo.

La velocidad de operación inercial fue definida en cada punto del trazado como la velocidad de operación media ponderada de un determinado tramo de carretera anterior a dicho punto. Esta definición trataba de modelizar el comportamiento de adquisición de expectativas de los conductores, el cual es decadente con el paso del tiempo.

Para identificar qué perfil de velocidad de operación era capaz de representar mejor el fenómeno, se estudiaron diferentes longitudes, intervalos de tiempo y distribuciones de pesos.

Como resultado del análisis de la relación entre la siniestralidad y el Índice de Consistencia Inercial, se identificó que el cálculo de la velocidad de operación inercial considerando un determinado intervalo de tiempo ofrecía mejores resultados que considerando una determinada longitud de tramo, lo que estaba en consonancia con el comportamiento de la mente humana.

Asimismo, el cálculo de la velocidad de operación inercial como la velocidad de operación media ponderada permitió cuantificar de una forma más precisa las expectativas de los conductores que calcularla a partir de la media aritmética, verificándose el comportamiento decadente de la memoria a corto plazo de las personas.

Como conclusión, se propone que la velocidad de operación inercial sea estimada considerando un intervalo de tiempo de 15 segundos y una distribución de pesos lineal. Esta velocidad permitirá el desarrollo de modelos de consistencia que representen mejor el fenómeno subyacente y, como consecuencia, una mejor estimación de la seguridad vial tanto en un tramo completo de carretera como en un elemento particular de la misma.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte del proyecto de investigación "CASEFU – Estudio experimental de la funcionalidad y seguridad de las carreteras convencionales" (TRA2013-42578-P), subvencionado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad y el Fondo Social Europeo. Además, el autor también quiere agradecer a la Conselleria de Vivienda, Obras Públicas y Vertebración del Territorio de la Generalitat Valenciana, al Área de Carreteras de la Diputación de Valencia y a la Dirección General de Tráfico perteneciente al Ministerio del Interior por facilitar los datos relativos al tráfico y accidentes.

REFERENCIAS

- [1] Camacho Torregrosa, F. J. Development and calibration of a global geometric design consistency model for two-lane rural highways, based on the use of continuous operating speed profiles. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2015.
- [2] Camacho-Torregrosa, F. J., A. M. Pérez-Zuriaga, J. M. Campoy-Ungría, A. García, and A. P. Tarko. Use of Heading Direction for Recreating the Horizontal Alignment of an Existing Road. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2015, vol. 30, no 4, p. 282-299.
- [3] Dirección General de Tráfico (DGT), 2017. <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/>
- [4] Fomento, M. de. Norma 3.1-IC Trazado, 2016.
- [5] Garach, L., F. Calvo, M. Pasadas, and J. de Oña. Proposal of a New Global Model of Consistency: Application in Two-Lane Rural Highways in Spain. Journal of Transportation Engineering, 2014, vol. 140, no 8, p. 04014030.
- [6] García, A., D. Llopis-Castelló, F. J. Camacho-Torregrosa, and A. M. Pérez-Zuriaga. New consistency index based on inertial operating speed. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, no 2391, p. 105-112.
- [7] Gibreel, G. M., S. M. Easa, Y. Hassan, and I. A. El-Dimeery. State of the art of highway geometric design consistency. Journal of Transportation Engineering, 1999, vol. 125, no 4, p. 305-313.
- [8] Lord, D., and F. Mannering. The statistical analysis of crash-frequency data: a review and assessment of methodological alternatives. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2010, vol. 44, no 5, p. 291-305.
- [9] Montella, A., and L. L. Imbriani. Safety performance functions incorporating design consistency variables. Accident Analysis & Prevention, 2015, vol. 74, p. 133-144.
- [10] Pérez-Zuriaga, A.M. Caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales a partir de la observación naturalística de la evolución de vehículos ligeros. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2012.
- [11] Polus, A., and C. Mattar-Habib. New consistency model for rural highways and its relationship to safety. Journal of transportation engineering, 2004, vol. 130, no 3, p. 286-293.
- [12] Revlin, R. Cognition: Theory and practice. Palgrave Macmillan, 2012.
- [13] Vangala, P., D. Lord, S.R. Geedipally. Exploring the application of the Negative Binomial-Generalized Exponential model for analyzing traffic crash data with excess zeros. Analytic methods in accident research, 2015, 7, p. 29-36.
- [14] WHO. Global status report on road safety 2015. World Health Organization, 2015. ❖