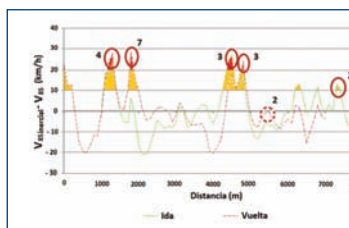


Nuevo índice de consistencia basado en la velocidad de operación inercial



New consistency index based on inertial operating speed

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*

David Llopis-Castelló

*Doctorando, Grupo de Investigación en Ing. de Carreteras
Universitat Politècnica de València*

Ana María Pérez-Zuriaga

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

Resumen

Los accidentes de tráfico se producen por la concurrencia de diferentes factores (factor humano, infraestructura y vehículo), siendo la infraestructura uno de los más importantes. La afección de dicho factor sobre la siniestralidad puede estudiarse mediante el concepto de consistencia del diseño geométrico. Este concepto está relacionado con la concordancia entre la geometría de la carretera y las expectativas que los conductores tienen de ella.

En el presente artículo se presenta un nuevo modelo de consistencia basado en el Índice de Consistencia Inercial (ICI) para la evaluación de las transiciones recta-curva en carreteras convencionales. Este nuevo índice consiste en el cálculo en el punto de inicio de la curva de la diferencia entre la velocidad de operación media del kilómetro anterior (velocidad de operación inercial) y la velocidad de operación en ese punto.

Para la calibración de este nuevo índice y de sus umbrales, se han estudiado 88 tramos de carretera convencional, en los que se ha contabilizado 1.686 transiciones recta-curva. En el estudio, se ha analizado, para cada una de las transiciones, la relación entre el valor del ICI correspondiente y su tasa de peligrosidad. Los resultados muestran que al aumentar el ICI aumenta también la tasa de

peligrosidad y, por tanto, la probabilidad de ocurrencia de accidentes. Adicionalmente, se ha estudiado la relación entre el ICI y la tasa de peligrosidad media ponderada, obteniendo resultados muy similares.

Con el fin de establecer los umbrales del nuevo índice de consistencia, se ha llevado a cabo un análisis tanto gráfico como estadístico. De él se ha concluido que la consistencia de una carretera puede considerarse buena cuando el ICI es menor de 10 km/h, media cuando se encuentra entre 10 y 20 km/h y pobre cuando es superior a este valor.

La validación del modelo planteado se ha llevado a cabo a partir del análisis de las transiciones recta-curva de 20 tramos de carretera convencional, dando como resultado una alta correlación entre el número de accidentes ocurridos en cada transición y los valores del ICI correspondientes. De esta forma, el Índice de Consistencia Inercial (ICI) y sus umbrales de consistencia han confirmado ser una nueva forma de evaluar la consistencia del diseño geométrico de carreteras convencionales.

PALABRAS CLAVES: carretera, diseño geométrico, consistencia, seguridad vial, velocidad de operación, velocidad de operación inercial.

Abstract

Road crashes occurrence depends on several factors: human factor, infrastructure factor and vehicle factor. The infrastructure factor is one of the most important. The influence of this factor on road safety can be analyzed by means of road design consistency. It refers to the conformance of highway geometry to drivers' expectations.

A new consistency model for evaluating the performance of tangent-to-curve transitions at two-lane rural roads is presented. It is based on the Inertial Consistency Index (ICI), defined for each transition. It is calculated at the beginning point of the curve, as the difference between the average operating speed of the previous 1 km road segment (inertial operating speed) and the operating speed at this point.

88 road segments, which included 1,686 tangent-to-curve transitions, were studied in order to calibrate ICI and its thresholds. The relationship between those results and the crash rate associated to each transition has been

analyzed. It has been pointed out that the higher the ICI is, the higher the crash rate is, thus increasing the probability of accidents to take place. Similar results were obtained from the study of the relationship between ICI and the weighted average crash rate of the corresponding group of transitions.

A graphical and statistical analysis established that road consistency may be considered good when ICI is lower than 10 km/h; poor when ICI is higher than 20 km/h; and fair otherwise.

A validation process has been carried out considering 20 road segments. The obtained ICI values were highly correlated to the number of crashes occurred at the analyzed transitions. Hence, the Inertial Consistency Index (ICI) and its consistency thresholds resulted in a new approach for consistency evaluation.

KEY WORDS: : highway, geometric design, consistency, road safety, operating speed, inertial operating speed.

1. Introducción

De entre los factores concurrentes que intervienen en la generación de un accidente de tráfico, pueden destacarse tres de ellos: el humano, el vehículo y la infraestructura. Pese a que el factor más relevante en este sentido es el humano, diversas investigaciones anteriores (1) han demostrado que la infraestructura juega un papel muy importante en este aspecto, estando detrás del 30 % de los accidentes. De hecho, este es el motivo por el cual los accidentes no se distribuyen de una forma completamente aleatoria, sino que tienden a concentrarse en determinados puntos de la red viaria.

Puede definirse "consistencia del diseño geométrico" como el grado de adecuación entre el comportamiento de la carretera y las expectativas de los conductores. Un diseño inconsistente da como resultado sorpresas en los conductores y, por tanto, mayor probabilidad de existir un comportamiento anómalo que derive en un accidente.

La mayoría de las investigaciones relacionadas con la consistencia y sus modelos desarrollados se centran en cuatro ámbitos principalmente: la velocidad de operación y sus variaciones, la estabilidad del vehículo, los índices de trazado y la carga de trabajo del conductor (2, 3). Entre ellos, los criterios más extendidos están basados en el análisis de la velocidad de operación (4), por ser relativamente sencilla su estimación pero a la vez ofrecer buenos resultados. Se define "velocidad de operación" como el percentil 85 (V_{85}) de la distribución de velocidades seleccionada por los conductores de vehículos ligeros en condiciones de flujo libre. Esta velocidad se emplea para evaluar la consistencia básicamente de dos formas: examinando su variación a lo largo de la vía (buscando deceleraciones bruscas o altas variaciones), o

comparándola con la velocidad de diseño. De hecho, las transiciones recta-curva son consideradas como las ubicaciones más críticas ya que se estima que más del 50 % de las muertes en carreteras interurbanas se producen en secciones curvas (5).

Considerando estos aspectos, Leisch y Leisch (6) revisaron el concepto de velocidad de diseño, incluyendo unas recomendaciones relacionadas tanto con las reducciones de velocidad de operación como con las diferencias entre las velocidades de diseño y de operación. Del mismo modo, Kanellaidis et al. (7) sugirieron que un diseño podía considerarse bueno cuando la diferencia entre la V_{85} de la recta y la de la curva siguiente no excedía los 10 km/h.

Sin embargo, el método de evaluación de la consistencia más extendido

Tabla 1. Umbrales para la determinación de la calidad de la consistencia del diseño. Criterios I y II de Lamm.

Rango de consistencia	Criterio I (km/h)	Criterio II (km/h)
Buena	$ V_{85} - V_d \leq 10$	$ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 10$
Media	$10 < V_{85} - V_d \leq 20$	$10 < V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20$
Pobre	$ V_{85} - V_d > 20$	$ V_{85i} - V_{85i+1} > 20$

es el desarrollado por Lamm et al. (8). Establecieron dos criterios de consistencia relacionados con la velocidad de operación, que incluían la diferencia entre la velocidad de operación y la de diseño (criterio I) y la diferencia de velocidad de operación entre elementos geométricos consecutivos (criterio II). Establecieron unos umbrales considerando las tasas de peligrosidad medias observadas en diferentes configuraciones.

La diferencia entre velocidad de operación y velocidad de diseño ($V_{85} - V_d$) permite la identificación de zonas del trazado cuyo diseño no se ajusta al trazado general de la carretera.

La reducción de velocidad de operación entre dos elementos consecutivos (ΔV_{85}) es una forma indirecta de cuantificar la sorpresa experimentada por los conductores, y se ha revelado como un indicador de consistencia muy sencillo y utilizado.

La Tabla 1 presenta un resumen de los umbrales de consistencia para los criterios I y II. El motivo de dividir la consistencia en umbrales es el de indicar claramente cuándo debe actuarse sobre la vía y cuándo no. Sin embargo, la realidad se comporta de forma continua. Es por ello que otros investigadores sugieren emplear funciones continuas para determinar el grado de consistencia (9).

Los criterios de consistencia presentados previamente son conocidos como modelos locales de consistencia, ya que permiten la evaluación de la consistencia de una única zona del trazado o de las transiciones recta-curva. Como se indicó anteriormente, en estos modelos se asume que la velocidad de operación resume en cierto modo el comportamiento de la carretera.

Así, estos modelos suponen que la velocidad de diseño del tramo de carretera o la velocidad de operación en el elemento anterior caracteriza las expectativas de los conductores. No obstante, estas hipótesis son excesivamente simplistas. Mientras que en el primer caso el tramo de carretera inmediatamente anterior a cada

transición no es tenido en cuenta, en el segundo se asume que el conductor únicamente basa sus expectativas en el último elemento geométrico recorrido. Es decir, ninguno de estos modelos ha analizado qué longitud del tramo considera inconscientemente el conductor para crear sus expectativas ad hoc.

Existen otros métodos de análisis de la consistencia basados en el análisis de la velocidad de operación, pero con un enfoque diferente. Dos ejemplos son los llevados a cabo por Polus y Mattar-Habib (10) y Camacho-Torregrosa et al. (11). En ambas aproximaciones se considera de forma completa el perfil de velocidad de operación de un tramo de carretera, reflejando en cierta medida su dispersión. En ambos métodos, se entiende que la dispersión en la velocidad de operación está ligada con los cambios en la carga cognitiva del trazado geométrico. Un elevado número de cambios en dicha carga cognitiva está asociado con una mayor siniestralidad.

En estos dos últimos modelos, además, se calibró un indicador continuo de consistencia, en vez de utilizar umbrales. Dicho indicador se relacionó con la siniestralidad, por lo que empleando estos métodos es posible estimar el número de accidentes con víctimas de un trazado geométrico.

Pese a estas dos últimas ventajas, los modelos globales son menos utilizados que los locales debido a la dificultad de estimar el perfil continuo de velocidad. Además, los modelos locales permiten identificar la zona concreta donde se produce el problema de inconsistencia. De todas formas, el uso de ambos modelos no es excluyente.

Finalmente, es importante destacar que cada modelo de consistencia ha sido calibrado para un determinado entorno geográfico y que el comportamiento de los conductores puede variar de una región a otra. Por tanto, la extrapolación de modelos y umbrales debe llevarse a cabo con precaución. De hecho, posteriores estudios realizados sobre la aplicabilidad de los

criterios de Lamm revelaron que mientras que un límite de 20 km/h para el diseño pobre sí es aplicable en Korea (12) no es recomendable para Italia (13).

2. Objetivos e hipótesis

El principal objetivo de la investigación que se presenta es el desarrollo de un nuevo índice para la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de carreteras convencionales que permita considerar adecuadamente las expectativas ad hoc de los conductores.

Se consideran dos hipótesis básicas. La primera de ellas (ya utilizada anteriormente por otros investigadores) consiste en asumir la velocidad de operación como respuesta del conductor al diseño geométrico de la carretera. Por ello, podrá utilizarse la velocidad de operación como indicador operacional de la geometría en sí. La segunda de las hipótesis (y principal aportación de la presente investigación) considera que las expectativas de los conductores en cada punto de la carretera pueden estimarse a través del promedio de la velocidad de operación desarrollada a lo largo de una determinada longitud anterior. A este promedio de la velocidad de operación se le ha denominado "velocidad de operación inercial" ($V_{85 \text{ inercial}}$). De acuerdo con ambas hipótesis, la diferencia entre la velocidad de operación inercial y la velocidad de operación muestra la discordancia entre las expectativas de los conductores y la geometría de la carretera.

3. Descripción de los datos

Las transiciones recta-curva son los puntos más conflictivos y peligrosos de los trazados de las carreteras. De hecho, Lamm et al. (5) estimaron que más del 50 % de los accidentes mortales en carreteras convencionales tienen lugar en ellas. Por ello, el modelo de consistencia desarrollado en la presente investigación se centra en estas transiciones.

En su desarrollo, se han analizado 88 tramos de carretera convencional de la provincia de Valencia, dentro de los cuales se han identificado 1.686 transiciones recta-curva. La longitud de estos tramos varía entre 2,0 km y 15,5 km, con una pendiente longitudinal aproximadamente llana (entre -3 % y 3 %). Ninguno de los tramos de carretera seleccionados presentaba intersecciones importantes, que pudieran variar significativamente los volúmenes de tráfico, las velocidades de operación o ser la causa de gran número de accidentes.

Intensidad de tráfico

Los datos de intensidad de tráfico se obtuvieron de la página web oficial de la Diputación de Valencia. Aunque el periodo de tiempo abarcado era de los últimos 15 años, únicamente se utilizaron los comprendidos entre 2001 y 2010, evitando así problemas de correlación temporal. También se analizó en detalle el historial de remodelaciones de los tramos, eliminando aquellos en los que se ha actuado en los últimos años. La intensidad media de tráfico de los tramos oscila entre 25.015 vh/d y 363 vh/d.

Siniestralidad

Los datos sobre accidentes también fueron suministrados por el Área de Carreteras de la Diputación de Valencia. Estos datos consisten en una lista de todos los accidentes registrados durante los citados años, caracterizados por su localización (detalle hectométrico), fecha y hora, condiciones de luminosidad, gravedad, tipo de vehículo, características del conductor, factores externos y causas, así como otras condiciones y observaciones. Con ellos se llevó a cabo un filtrado de los mismos en el que se descartaron los accidentes sin víctimas con el fin de prevenir posibles errores por falta de registro. Asimismo, se eliminaron también del análisis los accidentes causados por

factores externos, como por incapacidad previa del conductor o por el cruce de animales.

El primer paso del análisis fue identificar la localización de los accidentes, además del sentido en el que se produjeron. Debido a la precisión de los datos, la asignación de cada accidente a la transición correspondiente no fue directa. El criterio utilizado sitúa un accidente dentro de una determinada curva si el hectómetro en el que se produce se solapa con la longitud de la curva o con los 100 m posteriores a ésta, distinguiendo entre sentidos.

Perfiles continuos de velocidad de operación

Los perfiles de velocidad de operación se desarrollaron empleando los modelos de velocidad de operación desarrollados por Pérez-Zuriaga et al. (14). El modelo de velocidad de operación en curvas utiliza el radio como variable explicativa (Ec. 1 y 2).

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

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

Donde:

- V_{85C} : velocidad de operación en curva (km/h)
- R: radio de la curva (m)

Aunque este modelo no tiene en cuenta curvas con radio inferior a 70 m, no supone un problema, ya que ninguna transición estudiada lo ha requerido.

El modelo de velocidad de operación en rectas se basa en la longitud de la misma y en la velocidad de operación estimada para la curva anterior (Ec.3).

$$V_{85T} = V_{85C} + (1 - e^{-\lambda \cdot L}) \cdot (V_{des} - V_{85C}) \quad (3)$$

Donde:

- V_{85T} : velocidad de operación en recta (km/h)

- V_{85C} : velocidad de operación estimada en la curva previa (km/h)
- V_{des} : velocidad deseada (110 km/h)
- L: longitud de la recta (m)
- $\lambda = 0,00135 + (R-100) \cdot 7,00625 \cdot 10^{-6}$
- R: radio de la curva (m)

Para dar continuidad a los perfiles de velocidad de operación es necesario considerar también unas tasas de aceleración y deceleración, así como ciertas reglas de construcción. El modelo de deceleración fue desarrollado por Pérez-Zuriaga et al. (14) (Ec. 4), mientras que la tasa de aceleración fue determinada por Camacho-Torregrosa et al. (11) (Ec. 5).

$$d_{85} = 0,313 + (114,436/R) \quad (4)$$

$$\alpha_{85} = 0,41706 + (65,93588/R) \quad (5)$$

Donde:

- d_{85} : tasa de deceleración (m/s²)
- α_{85} : tasa de aceleración (m/s²)
- R: radio de la curva (m)

4. Desarrollo

Puesto que la seguridad vial está altamente relacionada con la consistencia del diseño geométrico, se consideró que la mejor forma de obtener y calibrar un modelo de consistencia era por medio de analizar su relación con la siniestralidad.

El parámetro inicial del modelo propuesto es la diferencia entre la velocidad de operación inercial ($V_{85 \text{ inercial}}$), como una estimación de las expectativas de los conductores, y la velocidad de operación (V_{85}), como una estimación del comportamiento de la geometría de la carretera. Este nuevo índice se denomina "Índice de Consistencia Inercial" (ICI).

La velocidad de operación inercial ($V_{85 \text{ inercial}}$) se define en cada punto como el promedio de la velocidad de operación a lo largo del tramo anterior de carretera. Para ello, en primer lugar fue necesario identificar qué longitud debía utilizarse para la construcción

de este índice, por medio de un análisis de sensibilidad. La consideración de longitudes de carretera inferiores a 1.000 m daba como resultado un perfil de velocidad de operación inercial demasiado similar al de velocidad de operación, sin contribuciones significativas. Por otra parte, considerar tramos de carretera mayores de 1.000 m dio como resultado un perfil demasiado suavizado, ocultando variaciones de velocidad significativas.

Después de este análisis, se concluyó que la longitud de carretera más recomendable para este tipo de estudios es 1.000 m. De esta forma, la velocidad de operación inercial fue finalmente definida como la media móvil del perfil de velocidad de operación de los 1.000 metros anteriores. La Figura 1 muestra un ejemplo de perfil de velocidad de operación inercial, considerando los dos sentidos de circulación,

además de los perfiles de velocidad de operación (uno en cada sentido) de los que se derivó.

El siguiente paso consistió en la calibración de la relación entre el nuevo índice de consistencia y la tasa de peligrosidad. Para ello se determinó el valor del ICI al inicio de la curva de cada una de las transiciones recta-curva. Se agruparon las transiciones según su valor del ICI. Posteriormente, para cada uno de estos grupos se calculó la tasa de peligrosidad media con el fin de establecer los umbrales de consistencia.

Tasa de peligrosidad vs ICI

La tasa de peligrosidad de cada transición recta-curva se calculó como el cociente entre el número de accidentes con víctimas asociado y el volumen de tráfico correspondiente (exposición al riesgo). Asimismo, se

determinó el ICI para cada una de las transiciones. La relación entre estas variables se muestra en la Figura 2.

La exposición al riesgo se tuvo en cuenta en función del número de vehículos que circularon por cada curva y sentido, durante el mismo periodo de tiempo que el registro de accidentes, sin que influya una mayor o menor longitud de la curva en el fenómeno que se quiere analizar de inconsistencia.

La Figura 2 muestra una clara relación entre la tasa de peligrosidad y el ICI. La tasa de peligrosidad aumenta a medida que lo hace el ICI. Sin embargo, debido a la gran cantidad de transiciones blancas (transiciones sin accidentes), no se pudieron obtener conclusiones adecuadas en este ámbito.

Tasa de peligrosidad media ponderada vs ICI

El segundo análisis se basó en la consideración de la relación entre el ICI y la tasa de peligrosidad media ponderada (TPmp). Para llevarlo a cabo se utilizaron dos tipos de diagramas. El primero de ellos (Figura 3) muestra la evolución de la TPmp en función del ICI, agrupado en intervalos de 5 km/h. La tasa de peligrosidad media ponderada se calculó para cada grupo dividiendo el número total de accidentes y el volumen total de tráfico.

Las columnas en azul reflejan la TPmp calculada considerando todas las curvas, mientras que las rojas corresponden a la TPmp calculada sin incluir las transiciones sin accidentes con víctimas (transiciones blancas). Se optó por realizar este doble análisis por la gran cantidad de transiciones de este último tipo, que podía influir drásticamente en los resultados del análisis.

Desde el punto de vista estadístico, los accidentes son eventos raros, aleatorios y discretos (procesos de Poisson). Debido a ello, suelen poder ajustarse a distribuciones de Poisson o Binomial Negativa. Sin embargo,

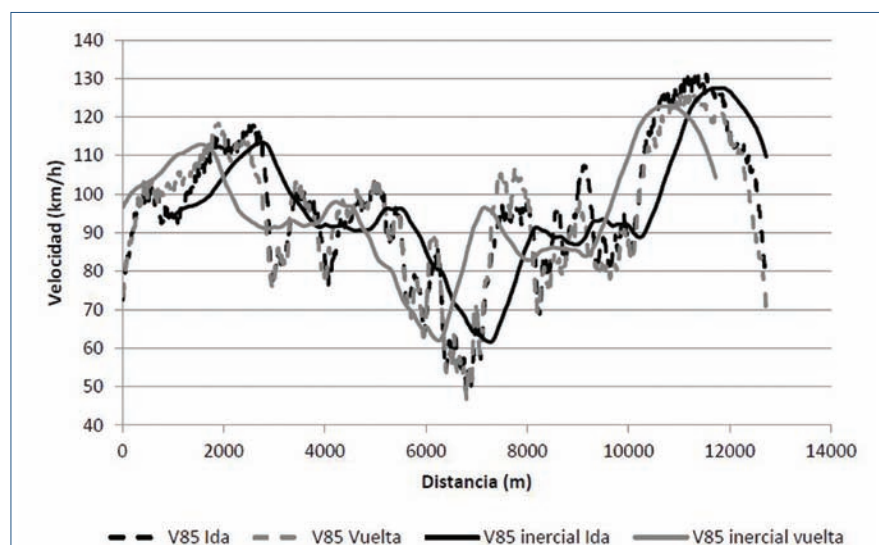


Figura 1. Ejemplo de perfil de velocidad de operación inercial.

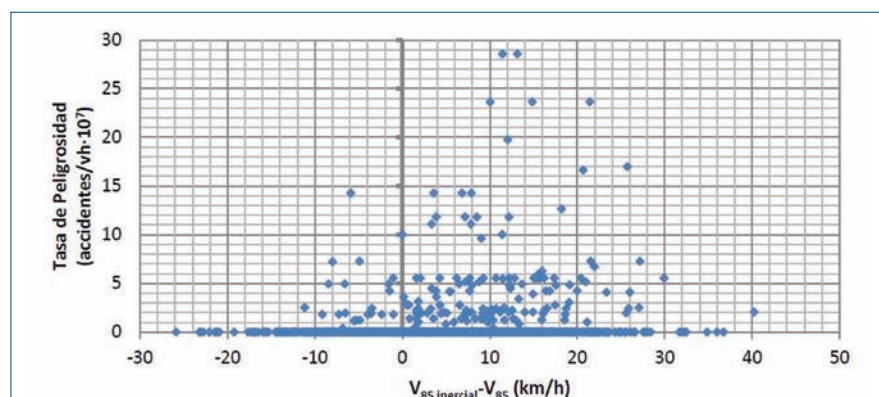


Figura 2. Tasa de peligrosidad vs ICI.

cuando los datos presentan una gran cantidad de ceros no es posible realizar este tipo de ajuste. Una transición recta-curva puede presentar cero accidentes por dos motivos: porque sea muy segura (tramo blanco puro) o por la aleatoriedad del fenómeno de la siniestralidad.

Existen técnicas específicas para diferenciar entre los casos anteriores, como los análisis Bayesianos, pero por lo general únicamente pueden aplicarse cuando se dispone de una amplia muestra de datos (no es el caso). Debido a ello, se optó por realizar el doble análisis, asumiendo que la solución real se debe encontrar en el espacio entre ambas soluciones parciales.

El segundo tipo de diagramas utilizados divide el ICI en intervalos de 10 km/h (Figura 4). Al igual que el anterior, en este también se muestra como la TPmp aumenta junto con el ICI.

Teniendo en cuenta que hay una alta proporción de curvas sin accidentes (transiciones blancas), se estudió, para cada intervalo, el porcentaje de estas comparado con el número total de transiciones (Figuras 5 y 6).

Las figuras 5 y 6 muestran una tendencia decreciente del porcentaje de transiciones blancas con el aumento del ICI. Este resultado pone de manifiesto que la proporción de curvas con accidentes aumenta con la diferencia entre la velocidad de operación inercial y la velocidad de operación. De acuerdo con esto, puede concluirse que el ICI presenta una fuerte relación con la seguridad vial, indicando que un mayor ICI denota una mayor probabilidad de ocurrencia de accidentes en una transición recta-curva.

Análisis de umbrales

Tras comprobar la relación entre ICI y siniestralidad, se procedió a determinar qué saltos de ICI realmente suponen un cambio significativo en el nivel de siniestralidad. En este sentido, la tasa de peligrosidad media ponderada presentada en la Figura 3 muestra claramente una tendencia creciente,

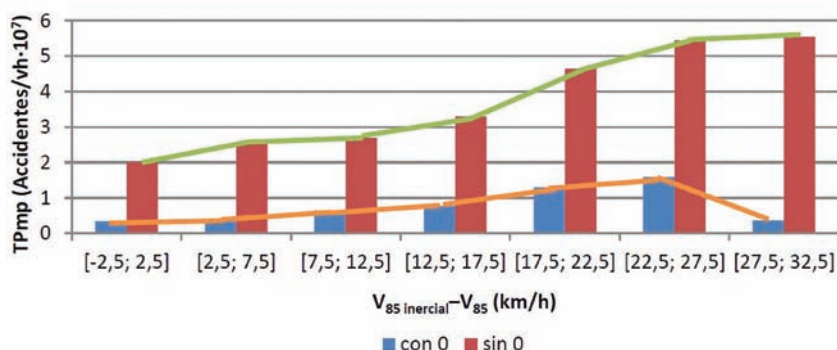


Figura 3. Tasa de peligrosidad media ponderada vs ICI (intervalos de 5 km/h).

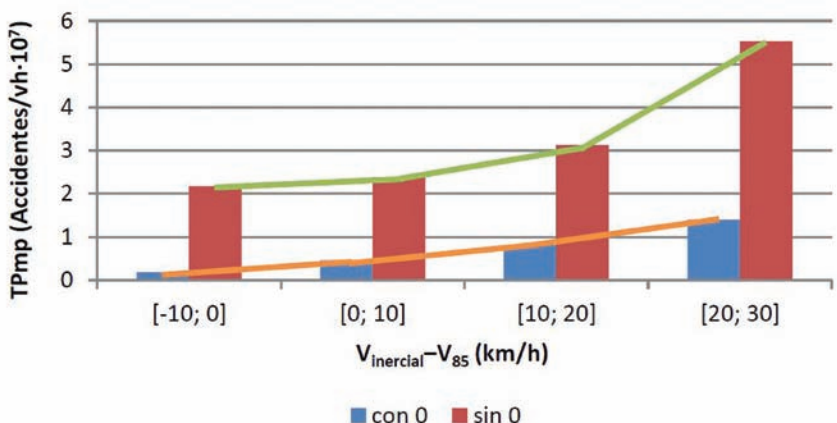


Figura 4. Tasa de peligrosidad media ponderada vs ICI (intervalos de 10 km/h).

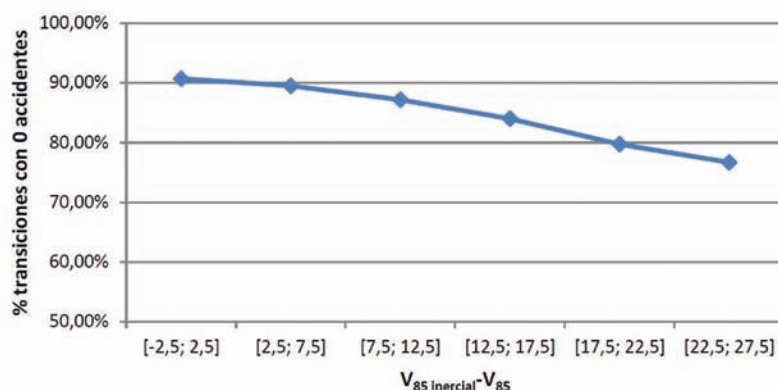


Figura 5. Porcentaje de transiciones blancas vs ICI (intervalos de 5 km/h).

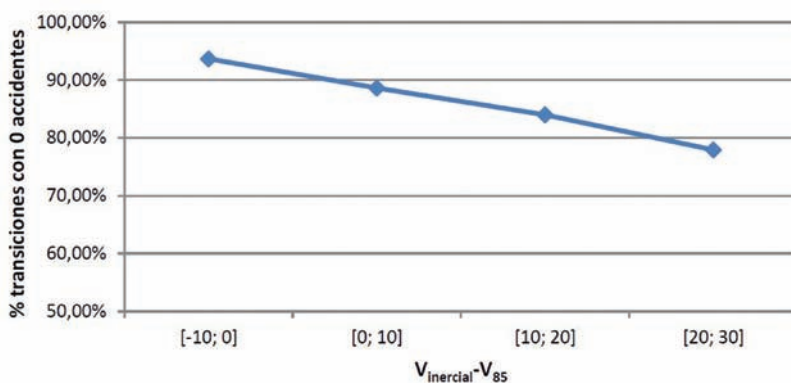


Figura 6. Porcentaje de transiciones blancas vs ICI (intervalos de 10 km/h).

aunque con dos comportamientos diferenciados (de -2,5 km/h a 12,5 km/h y de 12,5 km/h a 27,5 km/h).

No obstante, las diferencias entre tendencias aparecen más claramente en la Figura 4. Como puede verse, la tendencia permanece prácticamente horizontal desde -10 km/h a 10 km/h y aumenta considerablemente en el intervalo [10; 20] km/h. El intervalo [20; 30] km/h muestra un incremento aún mayor.

Con el fin de confirmar estos umbrales se llevó a cabo un análisis estadístico. El proceso se llevó a cabo utilizando los intervalos LSD ("Least Significant Difference") que se muestran en la Figura 7. En ellos se comparan diferentes intervalos de ICI,

asumiendo que dos muestras de ICI pertenecen a diferentes poblaciones (es decir, representan un comportamiento diferente) cuando sus intervalos no se solapan.

Este análisis puso de manifiesto que hay diferencias estadísticamente significativas, con un nivel de confianza del 95 %, entre las transiciones recta-curva con ICI entre [0; 10] km/h y [10; 20] km/h, además de entre [0; 10] km/h y [20; 30] km/h. Ambos resultados se obtuvieron teniendo en cuenta tanto todas las transiciones como excluyendo las transiciones blancas.

Sin embargo, las transiciones con valores de ICI entre 10 y 20 km/h y de 20 a 30 km/h parecen pertenecer a la misma población. Esto es debido a la

pequeña muestra de datos para este último intervalo (15 transiciones recta-curva sin accidentes), que también causa una alta dispersión de la tasa de peligrosidad. Se recomienda aumentar esta muestra en futuras investigaciones.

5. Propuesta de modelo de consistencia del diseño geométrico

Como se ha comentado anteriormente, el Índice de Consistencia Inercial (ICI) está relacionado con la seguridad vial y puede utilizarse para su análisis en las transiciones recta-curva. Los valores de sus umbrales están definidos en la Tabla 2.

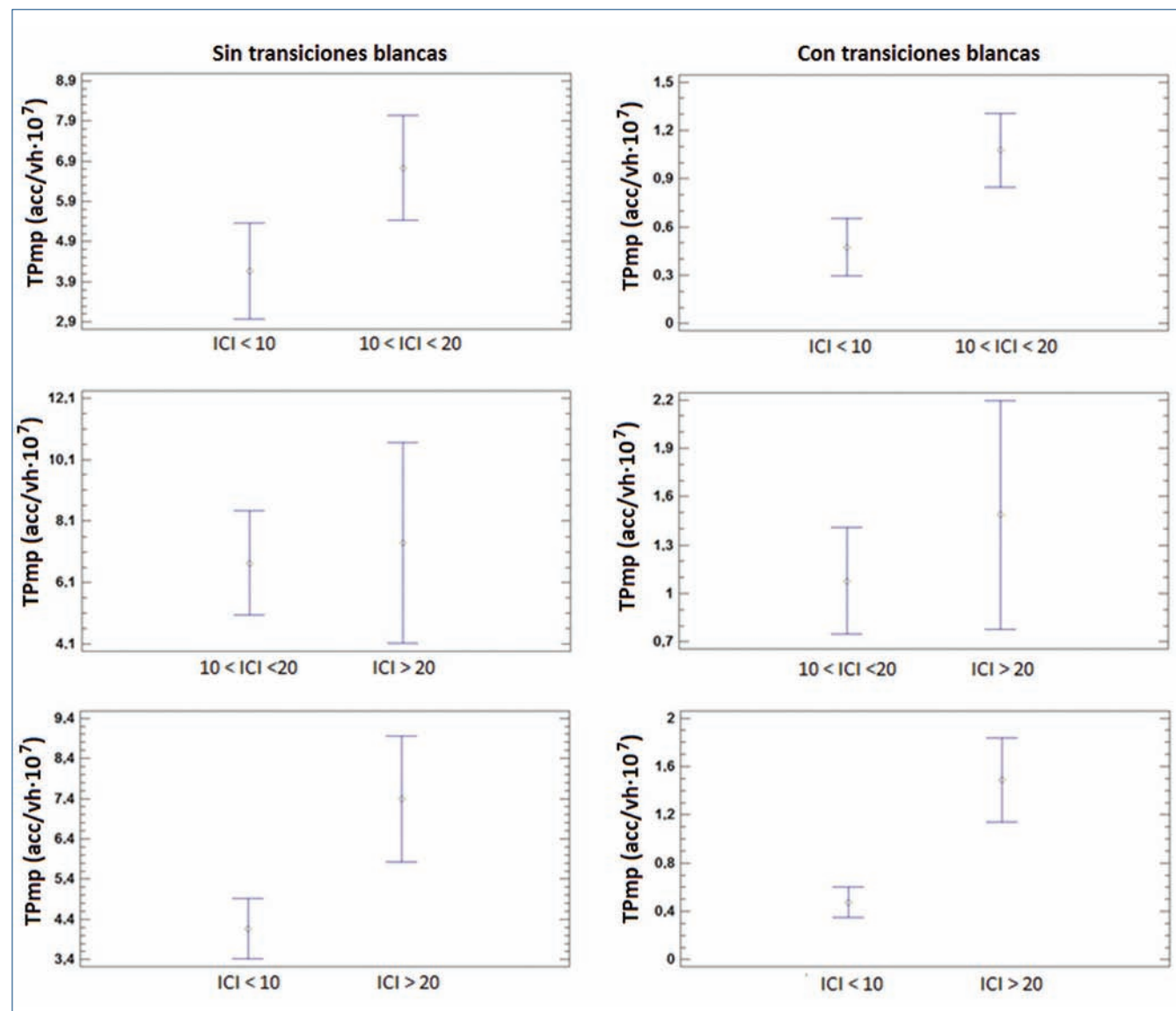


Figura 7. Intervalos LSD (95 %) para la determinación de los umbrales del modelo.

6. Validación

La validación del modelo propuesto para la evaluación de la consistencia del diseño geométrico se llevó a cabo mediante su aplicación a 20 tramos de carretera convencional, en los que se encontraban 370 transiciones recta-curva. En esta validación se utilizaron perfiles de velocidad empíricos obtenidos a partir de la metodología de toma de datos desarrollada por Pérez-Zuriaga et al. (14). Esta metodología permite recoger datos de conductores voluntarios, a los que se les pregunta si desean colaborar en la investigación, mientras circulan por el tramo seleccionado para llevar a cabo las observaciones; así hasta completar la muestra de tramos de carretera convencional. Los datos son recogidos mediante pequeños dispositivos GPS instalados en los propios vehículos de los voluntarios, quienes, a raíz de los resultados, se puede asumir que no están sesgados por el método de toma de datos (14).

Como se esperaba, las transiciones recta-curva identificadas como inconsistentes por el modelo ICI presentaron una mayor concentración de accidentes que el resto de transiciones del mismo tramo de carretera. La Figura 8 muestra la evaluación de consistencia en uno de los tramos de carretera y la localización de sus accidentes.

Con el fin de mejorar el análisis de validación, se desarrolló un gráfico comparando el ICI con la tasa de peligrosidad media ponderada (Figura 9), incluyendo todas las transiciones localizadas en los 20 tramos de carretera utilizados en el proceso. Las columnas azules se corresponden con la TPmp calculada a partir de todas las transiciones y las rojas con la TPmp calculada considerando únicamente las transiciones con accidentes con víctimas.

La Figura 9 muestra una tendencia creciente de la tasa de peligrosidad media ponderada con la diferencia entre la velocidad de operación inercial y la velocidad de operación. De hecho, las diferencias de TPmp entre los distintos intervalos de los valores de ICI son incluso mayores que las observadas durante el proceso de calibración. Estos puntos de inflexión se corresponden claramente con los umbrales identificados en el modelo de consistencia propuesto anteriormente.

7. Conclusiones

Los accidentes de tráfico son uno de los problemas más importantes en nuestra sociedad. Según diversas investigaciones, el factor infraestructura está detrás del 30 % de los accidentes que tienen lugar en carreteras convencionales. De hecho, los accidentes tienden a concentrarse en determinados tramos de carretera, jugando las características de la carretera un papel muy importante. Además, las transiciones recta-curva son consideradas como los puntos más conflictivos ya que más del 50 % de los accidentes tienen lugar en ellas.

Con el fin de mejorar el diseño geométrico de carreteras y la evaluación de la seguridad vial, este artículo presenta un nuevo modelo de consistencia del diseño geométrico para la evaluación de la calidad de las transiciones recta-curva en carreteras convencionales. El modelo propuesto está basado en la hipótesis de que la consistencia del diseño puede definirse como la diferencia entre las expectativas de los conductores y el comportamiento de la carretera.

El comportamiento de la carretera en un punto puede estimarse por medio de la velocidad de operación en ese punto, mientras que las expectativas

de los conductores se pueden estimar por la velocidad de operación inercial, definiéndose como la media móvil de la velocidad de operación durante los 1.000 metros anteriores. La diferencia entre ambos parámetros, llamada Índice de Consistencia Inercial (ICI), se ha convertido en una nueva herramienta para la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de carreteras y pretende reflejar mejor las expectativas ad hoc de los conductores.

El ICI y los umbrales de consistencia asociados fueron desarrollados estudiando los perfiles de velocidad de operación de 44 tramos de carretera convencional, teniendo en cuenta ambos sentidos de circulación, que incluían 1.686 transiciones recta-curva. Se calculó la diferencia entre la velocidad de operación inercial y la velocidad de operación en el punto de inicio de la curva de cada transición, para, posteriormente, evaluar la relación entre estos resultados y la tasa de peligrosidad asociada desde 2001 a 2010. Esta relación puso de manifiesto que un alto ICI está asociado a una alta probabilidad de accidente.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis gráfico y estadístico para establecer los umbrales del modelo de consistencia. De acuerdo con este análisis, la consistencia de una transición recta-curva puede considerarse buena si su ICI es menor de 10 km/h, media si se encuentra entre 10 km/h y 20 km/h, y pobre si es mayor de 20 km/h.

El modelo de consistencia propuesto fue validado mediante su aplicación a los perfiles de velocidad de operación empíricos de 20 tramos de carretera, que incluían 370 transiciones recta-curva. Los valores de ICI obtenidos se correlacionaron con el número de accidentes registrados en las transiciones estudiadas, validando las hipótesis y los resultados anteriores.

Tabla 2. Umbrales para la evaluación de la consistencia del diseño geométrico para el modelo inercial propuesto.

Buena	Media	Pobre
$V_{85\text{ inercial}} - V_{85} \leq 10 \text{ km/h}$	$10 \text{ km/h} < V_{85\text{ inercial}} - V_{85} \leq 20 \text{ km/h}$	$V_{85\text{ inercial}} - V_{85} > 20 \text{ km/h}$

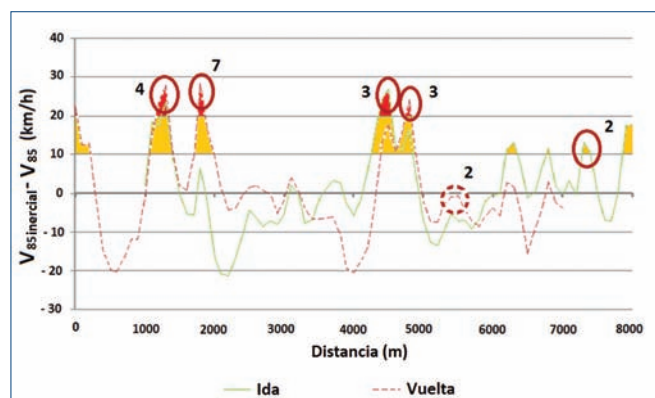


Figura 8. Ejemplo de identificación de inconsistencias y localización de accidentes de un tramo de carretera de la validación.

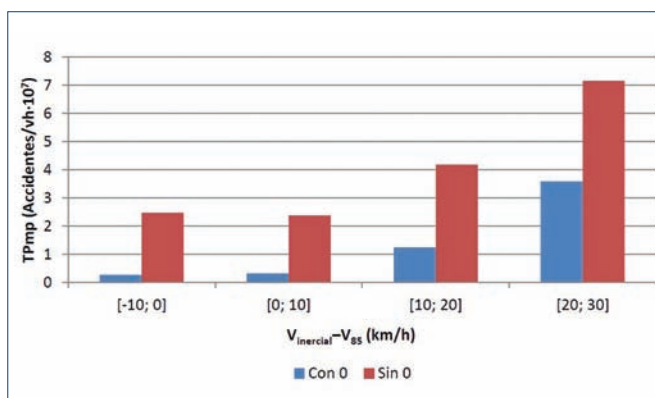


Figura 9. Tasa de peligrosidad media ponderada vs ICI (intervalos de 10 km/h) para la validación.

8. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Conselleria d'Infraestructures, Territori i Medi Ambient de la Generalitat Valenciana, y al Área de Carreteras de la Diputación de Valencia por el apoyo prestado en la recogida de datos y por 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).

9. Referencias Bibliográficas

- [1] Treat, J.R., Tumbas, N.S., McDonald, S.T., Shinar, D., Hume, R.D., Mayer, R.E., Stansifer, R.L. y Castellán, N.J. Tri-level study of the causes of traffic accidents: Final report – Executive summary. Bloomington. Institute for Research in Public Safety, 1979. [REPORT No. DOT-HS-034-3-535-79-TAC(S)].
- [2] Ng, J. C. W. y Sayed, T. Effect of Geometric Design Consistency on Road Safety. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 31, No. 2, 2004, pp. 218.
- [3] Awata, M. y Hassan, Y. Towards Establishing an Overall Safety-Based Geometric Design Consistency Measure. 4th Transportation Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, 2002.
- [4] Gibreel, G. M., Easa, S.M., Hassan, Y. y El-Dimeery, I.A. State of the Art of Highway Geometric Design Consistency. Journal of Transportation Engineering, Vol. 125, 1999, pp. 305-313.
- [5] Cai, H. y Rasdorf, W. (2008). "Modeling Road Centerlines and Predicting Lengths in 3-D Using Lidar Point Cloud and Planimetric Road Centerline Data". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 23, pp. 157-173.
- [6] Lamm, R., Choueiri, E. M. y Mallaender, T. 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, 1992, pp. 18-20.
- [7] Kanellaidis, G., Golias, J., y Efstathiadis, S. Driver's speed behaviour on rural road curves. Traffic Engineering and Control, Vol. 31(7/8), 1990, pp. 414-415.
- [8] Elamm, R., Psarianos, B. y Mallaender, T. Highway design and traffic safety engineering handbook. McGraw-Hill Companies, Inc., 1999.
- [9] Hassan, Y. Highway Design Consistency: Refining the State of Knowledge and Practice. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1881, 2004, pp. 63-71.
- [10] Polus, A. y Mattar-Habib, C. New Consistency Model for Rural Highways and its Relationship to Safety. Journal of Transportation Engineering, Vol. 130(3), 2004, pp.286-293.
- [11] Camacho-Torregrosa, F. J., Pérez-Zuriaga, A. M., Campoy-Undurraga, J.M. y García García, A. New Geometric Design Consistency Model Based on Operating Speed Profiles for Road Safety Evaluation. Accident, Analysis and Prevention, accepted DOI: 10.1016/j.aap.2012.10.001, 2012.
- [12] Lee, S., D. Lee, y J. Choi. Validation of the 10 MPH Rule in Highway Design Consistency Procedure. Proc., 2nd International Symposium on Highway Geometric Design, Mainz, Germany, 2000, pp. 364-376.
- [13] Cafiso, S. Experimental Survey of Safety Condition on Road Stretches with Alignment Inconsistencies. Proc., 2nd International Symposium on Highway Geometric Design, Mainz, Germany, 2000, pp. 377-387.
- [14] Pérez-Zuriaga, A.M., García García, A., Camacho-Torregrosa, F.J. y D'Attoma, P. Modeling operating speed and deceleration on two-lane rural roads with global positioning system data. Transportation Research Record Vol. 2171, 2010, pp.11-20. ❖