

Análisis de la seguridad vial mediante modelos globales de consistencia

Apellidos, nombre	Llopis Castelló, David ¹ (dallocas@upv.es) Camacho Torregrosa, Francisco Javier ¹ (fracator@tra.upv.es)
Departamento	¹ Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se presentan distintos modelos globales de consistencia que permiten evaluar la seguridad vial de un segmento completo de carretera. Al mismo tiempo, algunos de ellos permiten estimar el número de accidentes con víctimas esperado en un determinado intervalo de tiempo.

2 Objetivos

Una vez que el estudiante haya leído con detenimiento este documento, será capaz de:

- Definir el concepto de consistencia del diseño geométrico.
- Aplicar distintos modelos globales de consistencia.
- Estimar el número de accidentes con víctimas en un tramo de carretera.
- Priorizar las alternativas de diseño propuestas para un determinado proyecto de carretera en base a criterios de seguridad vial.

3 Introducción

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 (Figura 1). 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 vía. 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.

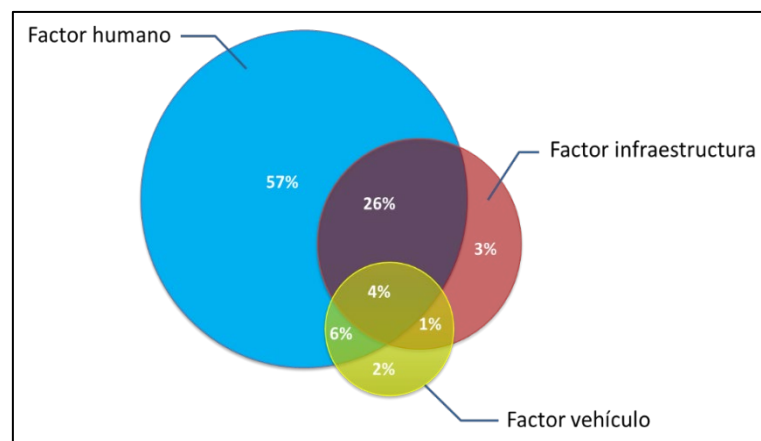


Figura 1. Interacción de los factores concurrentes en la siniestralidad.

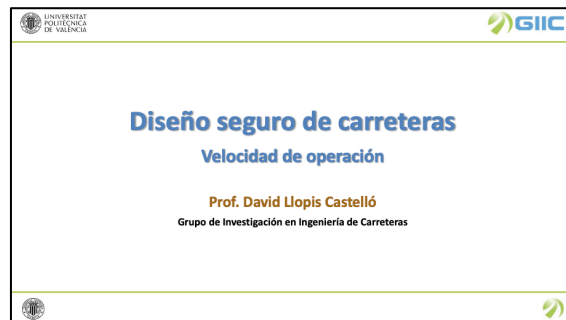
En este contexto, la consistencia del diseño se define como el grado de adecuación entre las expectativas de los conductores y el comportamiento de la carretera. El objetivo de la consistencia del diseño geométrico es garantizar que sus usuarios no se vean sorprendidos a lo largo de la misma, es decir, 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.

Así, un diseño consistente asegura que elementos geométricos sucesivos actúen de forma coordinada produciendo una conducción armoniosa libre de sorpresas. De esta manera, el número de accidentes se vería reducido, puesto que se evitaría que se produjesen maniobras de conducción críticas asegurando unas condiciones del tráfico seguras. 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.

Existen varios métodos para evaluar la consistencia del diseño geométrico de carreteras: velocidad de operación, estabilidad vehicular, índices de trazado y carga de trabajo del conductor (Ng and Sayed, 2004). No obstante, el uso de la velocidad de operación para determinar la consistencia es el método más comúnmente empleado. 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. Debido a que esta definición no presenta aplicación práctica para el ingeniero, ya que no es determinable, tradicionalmente se asocia al percentil 85 de la velocidad (V_{85}) a la que operan los vehículos ligeros en condiciones de flujo libre y sin restricciones ambientales.



Si deseas profundizar más sobre el concepto de la velocidad de operación, te recomendamos visualizar el siguiente vídeo didáctico:

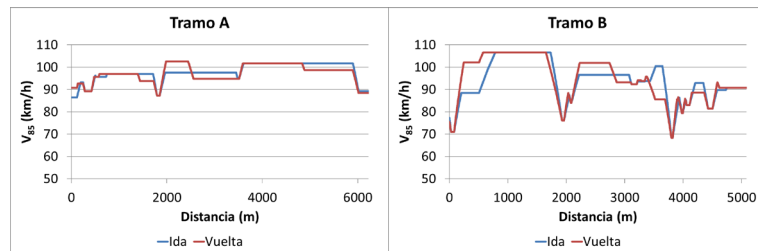


La consistencia puede ser analizada a partir de dos tipos de criterios: locales y globales. Los criterios locales se basan en el análisis de la consistencia de un elemento aislado del trazado a partir de las deceleraciones que se producen entre elementos sucesivos o la diferencia entre la velocidad de operación y la de diseño. Este tipo de modelos son ideales para detectar en qué elementos del trazado es más probable que ocurran los accidentes. Sin embargo, existen algunos tramos de carretera que no presentan inconsistencias locales pero sí exigen al conductor una carga de trabajo elevada debido principalmente a los constantes cambios de velocidad de operación experimentados a lo largo del tramo. Así, los modelos globales tratan de evaluar la consistencia de un tramo completo empleando diferentes variables obtenidas a partir del perfil continuo de velocidad de operación asociado. 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*).

A continuación, se presentan distintos modelos de consistencia global y, posteriormente, son aplicados en un caso de estudio para evaluar la seguridad vial de un tramo completo de carretera.



Antes de conocer los distintos modelos globales de consistencia del diseño geométrico de carreteras, observa los siguientes perfiles de velocidad de operación de dos tramos de carretera.



- ¿Qué tramo de carretera crees que presentará mayores problemas de siniestralidad?
- ¿En qué te has basado para responder a la pregunta anterior?

Podrás responder correctamente a estas preguntas tras la revisión de este artículo.

4 Modelos globales de consistencia

4.1 Modelo de consistencia de Polus y Mattar-Habib (2004)

El primer modelo de consistencia global fue el desarrollado por Polus y Mattar-Habib (2004). Estos partieron de la hipótesis de que un tramo de carretera con numerosas variaciones de la velocidad produce en los conductores una mayor carga de trabajo. Por tanto, los tramos que presentan estas condiciones son menos consistentes, incluso aunque no se identifiquen inconsistencias locales en el mismo.

Las dos variables fundamentales del modelo de consistencia propuesto por Polus y Mattar-Habib (2004) fueron la dispersión del perfil de velocidad de operación (σ) y el área relativa (R_a), que fue definida como el área encerrada entre el perfil de velocidad de operación y la velocidad de operación media, dividida por la longitud del tramo de carretera:

$$R_a = \sum |a_i|/L$$

donde R_a es el área relativa (m/s); $\sum |a_i|$ la suma de áreas (en valor absoluto) delimitadas entre el perfil de velocidad y la media de la velocidad de operación (m^2/s); y L longitud completa del tramo (m) (Figura 2).

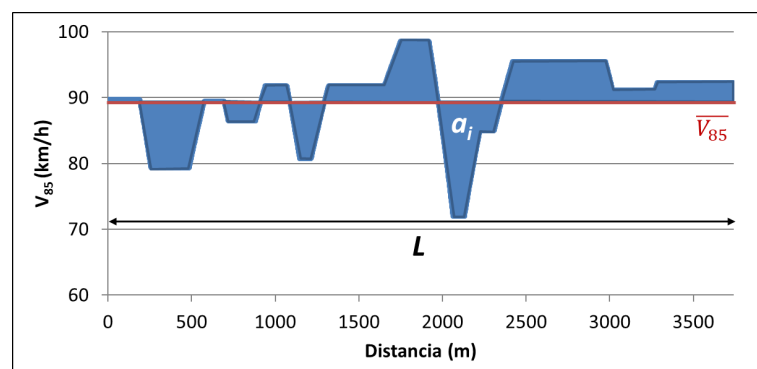


Figura 2. Estimación del área relativa (R_a).

A partir de estas dos variables fue definido el parámetro de consistencia (C) a través de la siguiente expresión:

$$C = 2,808 \cdot e^{-0,278 \cdot R_a \cdot \frac{\sigma}{3,6}}$$

En este sentido, a mayor valor de cualquiera de las variables consideradas, menor será la consistencia del tramo de carretera. En otras palabras, cuanto mayor sea el parámetro C , más consistente será el tramo y, consecuentemente, menos accidentes se esperan.

Adicionalmente, Polus y Mattar-Habib (2004) definieron una serie de umbrales para determinar de forma cualitativa el nivel de consistencia de un tramo de carretera. Dichos umbrales fueron resultado del análisis de la relación entre C y el número de accidentes observado en un conjunto de tramos de carretera (Tabla 1).

Buena	Aceptable	Pobre
$C > 2$	$1 < C \leq 2$	$C \leq 1$

Tabla 1. Modelo de consistencia global de Polus y Mattar-Habib (2004).

Finalmente, calibraron la siguiente expresión para determinar el índice de peligrosidad a partir del parámetro de consistencia propuesto:

$$IP = 1,051 \cdot e^{-0,377 \cdot C}$$

donde IP es el índice de peligrosidad (accidentes con víctimas/10⁶ veh-km); y C la consistencia de un segmento homogéneo de carretera.

Sin embargo, esta última expresión fue calibrada a partir de datos de siniestralidad observada en carreteras ubicadas en Israel, por lo que su uso en España no sería adecuado sin antes analizar su comportamiento. En este sentido, Camacho-Torregrosa (2009) adaptó el modelo a carreteras españolas obteniendo la siguiente expresión para estimar el índice de peligrosidad:

$$IP = 0,36108 \cdot e^{-0,3363 \cdot C}$$

En la misma dirección, Garach et al. (2014) propusieron el siguiente parámetro de consistencia basándose en las mismas variables que Polus y Mattar-Habib (2004) tras estudiar la siniestralidad en carreteras convencionales españolas:

$$C = \frac{195,073}{\left(\frac{\sigma}{3,6} - 5,7933\right) \cdot (4,1712 - R_a) - 26,6047} + 6,7826$$

Cabe destacar que este modelo fue desarrollado conservando los umbrales de consistencia presentados en la Tabla 1. Además, Garach et al. (2014) calibraron la siguiente Función de Estimación de la Siniestralidad (SPF) partiendo del parámetro de consistencia propuesto y la exposición al riesgo (volumen de tráfico y longitud del tramo de carretera):

$$y_{i,10} = e^{-8,7282} \cdot IMD^{1,0674} \cdot L^{0,8179} \cdot e^{-0,1931 \cdot C}$$

donde $y_{i,10}$ son los accidentes con víctima estimados en 10 años; IMD la intensidad media diaria de tráfico (veh/día); L la longitud del segmento de carretera homogéneo (km); y C el parámetro de consistencia de Garach et al. (2014).

4.2 Modelo de consistencia de Camacho-Torregrosa (2015)

El modelo de consistencia propuesto por Camacho-Torregrosa (2015) está compuesto por dos variables operacionales: la velocidad de operación media (\overline{V}_{85}) y la tasa de deceleración media (\overline{d}_{85}) (Figura 3).

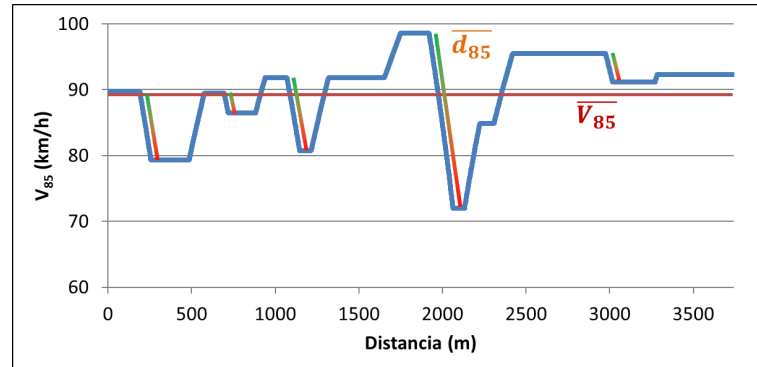


Figura 3. Variables operacionales del modelo de consistencia de Camacho-Torregrosa (2015).

De esta forma, carreteras que presentan una mayor velocidad de operación media y menores deceleraciones tienden a presentar un menor número de accidentes. Así, el modelo quedó definido a partir del siguiente parámetro de consistencia:

$$C = \sqrt[3]{\frac{\overline{V}_{85}}{\overline{d}_{85}}}$$

donde C es el parámetro de consistencia ($s^{1/3}$); \overline{V}_{85} la velocidad de operación media (m/s); y \overline{d}_{85} la deceleración media (m/s^2).

Relacionando este parámetro de consistencia con la siniestralidad ocurrida en un total de 153 segmentos de carretera convencional ubicados en España, Camacho-Torregrosa (2015) definió los umbrales de consistencia que se presentan en la Tabla 2.

Buena	Aceptable	Pobre
$C \geq 3,25 s^{1/3}$	$2,55 s^{1/3} \leq C < 3,25 s^{1/3}$	$C < 2,55 s^{1/3}$

Tabla 2. Modelo de consistencia global de Camacho-Torregrosa (2015).

Finalmente, la siguiente expresión permite estimar el número esperado de accidentes con víctimas en 10 años en un tramo de carretera partiendo del parámetro de consistencia C propuesto por Camacho-Torregrosa (2015) y la exposición al riesgo (volumen de tráfico y longitud del tramo de carretera):

$$y_{i,10} = e^{-4,26225} \cdot L^{1,13196} \cdot IMD^{0,85298} \cdot e^{-0,6574 \cdot C}$$

donde $y_{i,10}$ son los accidentes con víctima estimados en 10 años; IMD la intensidad media diaria de tráfico (veh/día); L la longitud del segmento de carretera homogéneo (km); y C el parámetro de consistencia de Camacho-Torregrosa (2015).

4.3 Modelo de consistencia de Llopis-Castelló et al. (2018)

A pesar de la gran contribución de los modelos de consistencia presentados anteriormente en el análisis de la seguridad vial, es cierto que estos modelos no son capaces de evaluar de manera precisa el grado de adecuación entre las expectativas de los conductores y el comportamiento de la carretera. Esto se debe a que ninguno de ellos incorpora una variable

que represente y cuantifique exclusivamente las expectativas de los conductores. En otras palabras, las variables que incorporan los modelos de consistencia de Polus y Mattar-Habib (2004) y Camacho-Torregrosa (2015) describen de manera muy general el comportamiento de los conductores a lo largo de un tramo de carretera.

Para salvar esta deficiencia, Llopis-Castelló et al. (2018) propone el empleo de la velocidad de operación inercial (V_i). Este concepto de velocidad trata de representar el proceso de generación de expectativas de los conductores, el cual está estrechamente ligado a la memoria a corto plazo de las personas, siendo decadente con el paso del tiempo. Esto significa que los conductores recuerdan con mayor claridad aquello que recorren en última instancia y, por tanto, sus expectativas dependen del tiempo transcurrido.

Partiendo de esta hipótesis, Llopis-Castelló et al. (2018) definieron la velocidad de operación inercial (V_i) como la velocidad de operación media ponderada de los últimos 15 segundos recorridos, considerando una distribución lineal de los pesos (Figura 4).

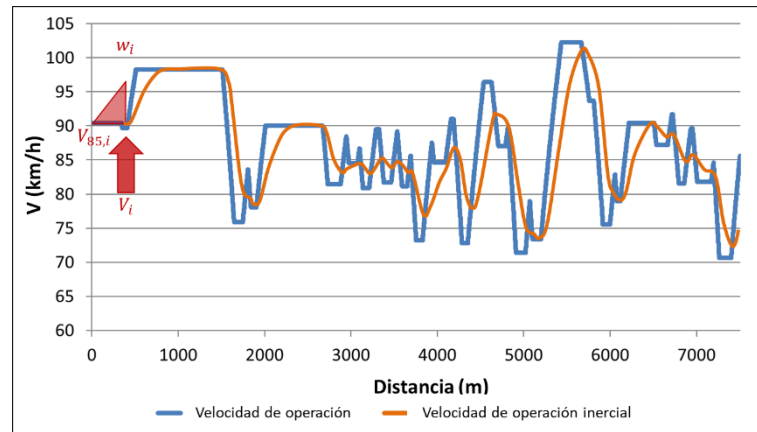


Figura 4. Estimación de la velocidad inercial.

Concretamente, la velocidad de operación inercial es calculada a través de la siguiente expresión:

$$V_{i,k} = \frac{\sum w_j \cdot V_{85,j}}{\sum w_j}$$

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 . El peso en cada intervalo (w_j) toma valores entre 0 y 1 de acuerdo con la siguiente expresión:

$$w_j = \frac{j}{n}$$

donde n es el número de intervalos considerados en el cálculo y j el intervalo en el que se calcula el valor del peso.

Recomendación

Para el cálculo de la velocidad de operación inercial habrá que previamente estimar las velocidades que se producen 15 segundos antes del punto donde queremos estimar V_i . Para ello, se recomienda el uso de intervalos de tiempo separados 0,1 segundos para $V_{85,j}$.

De esta manera, se dispondrá de un total de 150 intervalos ($V_{85,j}$) cuyo peso (w_j) será igual a la posición de cada $V_{85,j}$ dividido entre 150, de manera que la velocidad $V_{85,j}$ más alejada del punto donde se calcule V_i posea el peso mínimo.

Si quieres obtener de manera automática este perfil puedes emplear la siguiente herramienta:

[Calculadora de Velocidad de Operación Inercial](#)

En base a este nuevo concepto de velocidad, Llopis-Castelló et al. (2018) propusieron un nuevo modelo de consistencia global basado en la diferencia del perfil de velocidad de operación inercial, que representa las expectativas de los conductores, y la diferencia del perfil de velocidad de operación, que representa la velocidad que pueden alcanzar los usuarios de la vía en función de la geometría de esta (Figura 5).

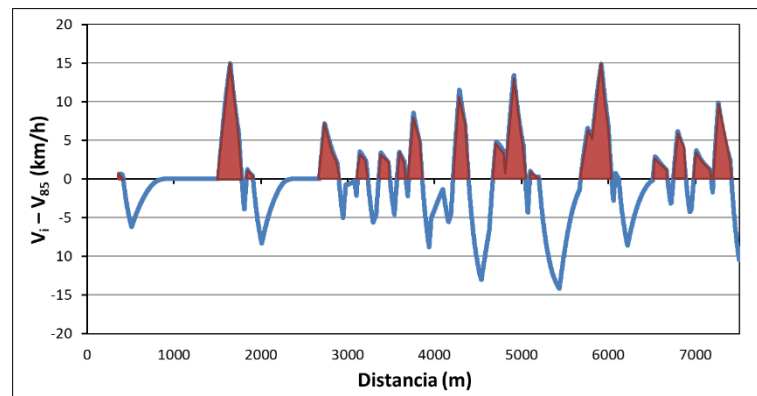


Figura 5. Diferencia del perfil de V_i y el perfil de V_{85} .



Observa la Figura 5 e intenta responder a las siguientes cuestiones antes de continuar con la lectura del artículo:

- ¿Qué ocurre cuando la diferencia entre ambos perfiles es positiva?
- ¿Y si es negativa?
- ¿En qué situación crees que los conductores pueden verse sorprendidos?

Como bien habrás anticipado, en este nuevo perfil la parte positiva nos indica que la velocidad de operación inercial es mayor que la velocidad de operación y, por tanto, la velocidad que espera desarrollar el usuario de la vía es mayor que la que la propia carretera le permite de acuerdo a sus características geométricas. En definitiva, en estas localizaciones los conductores se ven sorprendidos por las características de la vía, lo que lleva a que tengan que adaptar de manera inmediata su conducción a las condiciones del trazado con el riesgo que esto conlleva. Por tanto, cuanto mayor sea el área positiva encerrada en el diagrama de la Figura 5 y mayores sean los picos de diferencia de velocidad que se alcanzan, mayor riesgo de ocurrencia de accidentes.

Partiendo de estas hipótesis, Llopis-Castelló et al. (2018) propusieron el siguiente parámetro de consistencia:

$$C = \sqrt{\frac{A(+)}{L(+)} \cdot \sigma(+)} \quad (\text{km/h})$$

donde C es el parámetro de consistencia (km/h); $A(+)$ el área encerrada por el diagrama que muestra la diferencia entre V_i y V_{85} , y el eje x considerando únicamente las diferencias positivas (m·km/h); $L(+)$ la longitud de tramo de carretera donde se producen diferencias de velocidad positivas entre V_i y V_{85} (m); y $\sigma(+)$ la desviación estándar de la diferencia entre V_i y V_{85} considerando únicamente las diferencias de velocidad positivas (km/h).

De esta forma, cuanto mayor sea $A(+)$ o $\sigma(+)$, menor será el nivel de consistencia de un segmento homogéneo de carretera, puesto que significa que existen mayores diferencias entre las expectativas de los conductores y el comportamiento de la carretera. Además, para un mismo valor de $A(+)$, cuanto mayor sea $L(+)$, mayor será el nivel de consistencia del segmento de carretera homogéneo. Por tanto, a menor valor de C , mayor es el nivel de consistencia del tramo de carretera y, consecuentemente, menor es la probabilidad de ocurrencia de accidentes. Como resultado, los umbrales que permiten determinar de manera cualitativa el nivel de consistencia de un tramo de carretera según este modelo de consistencia son los presentados en la Tabla 3.

Buena	Aceptable	Pobre
$C \leq 2,75 \text{ km/h}$	$2,75 \text{ km/h} < C \leq 4,5 \text{ km/h}$	$C > 4,5 \text{ km/h}$

Tabla 3. Modelo de consistencia global de Llopis-Castelló et al. (2018).

Por último, Llopis-Castelló et al. (2018) también calibraron una SPF para estimar el número de accidentes con víctimas en carreteras convencionales españolas. Esta función, que combina el parámetro de consistencia propuesta con la exposición al riesgo, es la que se presenta a continuación:

$$Y_{i,10} = e^{-6,6479} \cdot L^{1,02645} \cdot IMD^{0,86684} \cdot e^{0,14774 \cdot C}$$

donde $Y_{i,10}$ son los accidentes con víctima estimados en un tramo de carretera en 10 años; L la longitud del tramo de carretera (km); IMD la intensidad media diaria de tráfico (veh/día); y C el parámetro de consistencia de Llopis-Castelló et al. (km/h).

5 Caso de estudio

Imaginemos que queremos evaluar la seguridad vial del tramo de carretera de la CV-132 comprendido entre Sant Mateu y Xert (Figura 6). Para ello, vamos a aplicar los modelos de consistencia estudiados en este artículo. Particularmente, como la carretera está ubicada en España, se empleará el parámetro de consistencia propuesto por Garach et al. (2014), en detrimento del definido por Polus y Mattar-Habib (2004), y los parámetros propuestos por Camacho-Torregrosa (2015) y Llopis-Castelló et al. (2018).

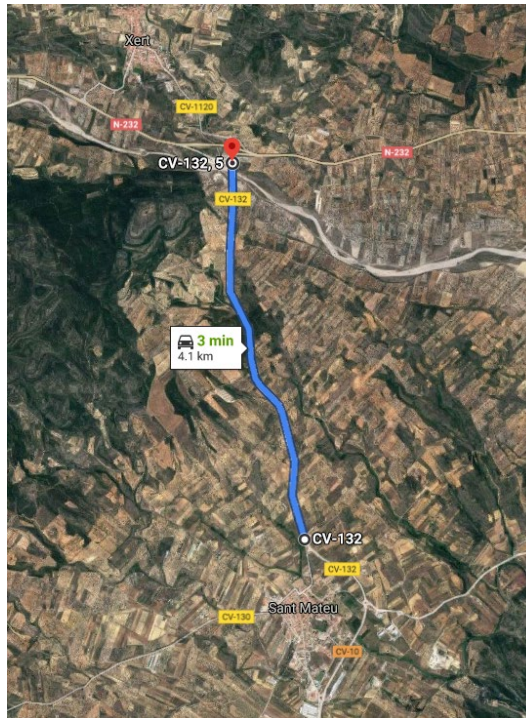


Figura 6. Tramo de carretera de estudio.

El primer paso para llevar a cabo la aplicación de estos modelos será la estimación del perfil de velocidad de operación. En este sentido, se propone la utilización de modelos de velocidad de operación desarrollados en España. Cabe destacar que la utilización de modelos calibrados en otros países no representará adecuadamente el fenómeno, pues no serán capaces de recoger adecuadamente el comportamiento de los conductores españoles. En este caso, tras la aplicación de los modelos de velocidad de operación propuestos por Pérez-Zuriaga (2012) y la definición de la velocidad de operación inercial de Llopis-Castelló et al. (2018), se han obtenido los perfiles de velocidad del tramo de estudio (Figura 7).

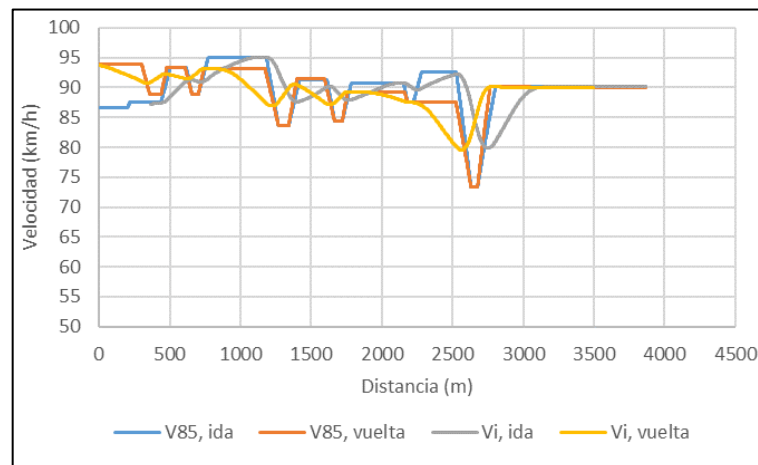


Figura 7. Perfiles de velocidad.

Partiendo de estos perfiles de velocidad se han obtenido las variables que incorpora cada uno de los modelos globales de consistencia y se ha estimado el parámetro de cada uno de ellos (Tabla 4). Asimismo, conociendo que la Intensidad Media Diaria (IMD) de tráfico es 2.626 veh/día y su longitud es 3.870 m, se ha estimado el número esperado de accidentes.

Llopis-Castelló et al. (2018)		Camacho-Torregrosa (2015)		Garach et al. (2014)	
C (km/h)	$\gamma_{i,10}$	$C (s^{1/3})$	$\gamma_{i,10}$	C	$\gamma_{i,10}$
3,6534	8,2	3,0621	7,6	2,2587	7,0

Tabla 4. Resultados de la evaluación de la consistencia global.

De esta forma, se puede concluir que el tramo de carretera analizado posee un nivel de consistencia aceptable según los modelos de Llopis-Castelló et al. (2018) y Camacho-Torregrosa (2015) y pobre de acuerdo con el modelo propuesto por Garach et al. (2014). Además, el número esperado de accidentes en el tramo se sitúa entre 7,0 y 8,2 accidentes con víctimas en 10 años.

6 Conclusión

En este documento hemos estudiado el concepto de consistencia del diseño geométrico de carreteras desde una perspectiva global. El conocimiento de los modelos globales de consistencia nos permite determinar el nivel la seguridad vial de un tramo completo de carretera y, al mismo tiempo, estimar los accidentes con víctimas que se espera que ocurran en 10 años. Como resultado, la aplicación de este tipo de modelos se presenta como una herramienta útil para evaluar la seguridad vial de una red de carreteras con el fin de proponer una priorización de actuaciones de mejora de la seguridad vial y, al mismo tiempo, nos permite jerarquizar las distintas alternativas propuestas durante la redacción de un proyecto de nuevo trazado o acondicionamiento de una carretera ya existente.

7 Bibliografía

- Camacho Torregrosa, F.J. (2015). *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).
- Camacho-Torregrosa, F.J. (2009). *Estudio de un modelo global de consistencia del diseño geométrico de tramos de carreteras convencionales. Aplicación a la evaluación de la seguridad vial de las alternativas propuestas por los estudios informativos de la variante de Ayora de la CN-330 (Provincia de Valencia) y en la variante de los Pedrones en la N-330 (Provincia de Valencia)*. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain).
- Garach, L., Calvo, F., Pasadas, M. & de Oña, J. (2014). Proposal of a New Global Model of Consistency: Application in Two-Lane Rural Highways in Spain. *Journal of Transportation Engineering*, 140(8), 04014030.
- Llopis-Castelló, D., Camacho-Torregrosa, F. J. & García, A. (2018). Development of a global inertial consistency model to assess road safety on Spanish two-lane rural roads. *Accident Analysis & Prevention*, 119, 138-148.
- Ng, J. & Sayed, T. (2004). Effect of geometric design consistency on road safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 218-227.
- Pérez-Zuriaga, A.M. (2012). *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).
- Polus, A. & Mattar-Habib, C. (2004). New Consistency Model for Rural Highways and Its Relationship to Safety. *Journal of transportation engineering*, 130(3), 286-293.