

Procedimientos de evaluación de la consistencia del trazado de las carreteras: IHSDM



Figura 1. Curva de 9 m de radio en la carretera M-629.

POR JOSÉ FERNANDO SÁNCHEZ ORDOÑEZ, UNIVERSIDAD DEL CAUCA, COLOMBIA
MARIA CASTRO MALPICA, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.

Introducción

La consistencia del trazado de una carretera es un factor destacado en el diseño de ésta, debido a su demostrada influencia en la siniestralidad. Aunque está implícita en aspectos de la normativa vigente, como la relación entre radios de curvas consecutivas y la velocidad de planeamiento, el uso de procedimientos específicos para su evaluación puede facilitar y mejorar su análisis.

En este artículo se resumen los principales métodos de evaluación de la consistencia del trazado, haciendo especial hincapié en el utilizado por el IHSDM¹, programa

informático desarrollado por la FHWA². Por último, se expone el estudio de la consistencia del trazado que se ha llevado a cabo en tres carreteras interurbanas de dos carriles mediante el citado programa informático.

Consistencia del trazado

Se entiende por **consistencia** del trazado, la relación entre las características geométricas reales de una carretera y las que espera encontrar el conductor de un vehículo que circula por ella.

Cuando el trazado corresponde a lo que el conductor espera encontrar, la vía es **consistente**, lo que minimiza la posibilidad de que cometa errores y efectúe maniobras inseguras.

Si la vía no responde a las expectativas del conductor, su tra-

zado es **inconsistente**, lo que puede generar maniobras como frenazos o cambios de trayectoria bruscos. Los estudios muestran que en curvas que requieren una reducción de velocidad de más de 20 km/h se presentan tasas de accidentes seis veces superiores a las de las curvas que no requieren reducción de velocidad [8].

La consistencia está íntimamente ligada con la **homogeneidad** del trazado. Si la vía mantiene unas características geométricas relativamente homogéneas a lo largo de un tramo, el conductor maniobrará sin sobresaltos, lo que incrementa las condiciones de seguridad.

El paso de un tramo a otro de características muy diferentes (de-

1: *Interactive Highway Safety Design Model: Modelo interactivo de diseño de seguridad vial.*

2: *Federal Highway Administration. Administración vial de carreteras (de los EE.UU.)*

terminadas por aspectos como la orografía, la utilización del suelo u otros) debe hacerse de manera gradual, de modo que el conductor tenga tiempo para adaptarse a las nuevas condiciones. Este aspecto está considerado en la normativa actual (velocidad de planeamiento); pero a veces no se cumple o no es suficiente para asegurar la consistencia del trazado en términos de la uniformidad en la velocidad de recorrido a lo largo de la carretera [5].

Procedimientos de evaluación

Fundamentalmente se pueden diferenciar dos procedimientos de evaluación de la consistencia del trazado [2].

- Los métodos basados en el nivel de atención del conductor.
- Los métodos basados en el perfil de velocidades de recorrido.

Los métodos basados en el nivel de atención del conductor estudian la demanda de concentración que la carretera impone al conductor. Las inconsistencias son una violación de las expectativas de éste e imponen altos niveles de atención; por lo que conviene comprender las reacciones psicológicas del conductor y su impacto en la conducción.

Los métodos basados en el nivel de atención son más complejos, debido a la gran cantidad de variables que intervienen y a la dificultad de modelar los comportamientos psicológicos. En cambio, los procedimientos fundamentados en el análisis de las velocidades de recorrido son más objetivos y están más desarrollados.

Los métodos basados en la estimación del perfil de velocidades han sido empleados en Estados Unidos, Suiza, Alemania y Australia, utilizando como principal parámetro de evaluación la curvatura en planta de la carretera. Se fundamentan en determinar la velocidad a la que un vehículo tipo puede circular a lo largo del tramo

en estudio, afectándola únicamente por el trazado y estableciendo comparaciones con unos criterios definidos. En los últimos años, además del valor del radio o de la curvatura en planta, se ha involucrado el efecto de la inclinación de la rasante y de los acuerdos verticales, lo que da un mayor grado de representación a los modelos de simulación.

Los procedimientos basados en la estimación del perfil de velocidades consideran diferentes criterios para mejorar las condiciones de seguridad de una carretera desde el punto de vista de la consistencia del trazado [6].

1. Armonizar la velocidad específica con la de recorrido. Idealmente, la velocidad real de recorrido no debe superar en más de 10 km/h a la velocidad específica. Diferencias superiores a 20 km/h indican que los vehículos circulan a velocidades superiores a aquéllas para las que fue diseñada la vía; y, por tanto, encontrarán en su recorrido unos elementos con características geométricas que no se corresponden con esa velocidad, lo que puede dar lugar a maniobras inseguras.

2. Armonizar la velocidad de recorrido entre elementos consecutivos. Al pasar de un elemento a otro, la diferencia de velocidad debe ser como máximo de 10 km/h. Una disminución de velocidad de más de 20 km/h incrementa la posibilidad de accidentes.

3. Proporcionar una seguridad dinámica en la conducción. Se debe comparar el rozamiento transversal realmente movilizado con el asumido en el diseño. La diferencia entre ambos debe ser como máximo de 0,02, para poder asegurar que se ha efectuado un diseño adecuado.

Hay que destacar el esfuerzo que está llevando a cabo la Administración Federal de Carreteras norteamericana (FHWA) en este campo de la consistencia del trazado. Así, ha desarrollado, dentro de una herramienta informática más amplia de estudio de la

seguridad vial como es el IHSDM³, un procedimiento para el estudio de la consistencia, basado en el análisis de las velocidades de recorrido. Además, tiene previsto complementarlo con un módulo, también como parte del IHSDM, que evalúa el comportamiento del conductor [3].

Este módulo simulará los procesos de percepción, conocimiento y control para generar acciones como maniobras, frenado y aceleración; y estimará la velocidad y trayectoria del vehículo a lo largo de una carretera de dos carriles, basándose en la percepción física de la situación, en la velocidad y en la trayectoria deseadas, en el control de la velocidad y de la trayectoria y en el grado de atención del conductor.

IHSDM

Como se ha mencionado, el IHSDM es un programa informático desarrollado por la FHWA, que permite evaluar varios aspectos relacionados con la seguridad vial.

Puede ser usado por planificadores, proyectistas y administradores de carreteras, y facilita la detección de problemas potenciales de seguridad, la comparación de la seguridad de varias alternativas o la optimización de la seguridad de un diseño determinado.

El IHSDM empezó a gestarse en 1999, y está previsto que esté compuesto por seis módulos independientes:

- Módulo de predicción de accidentes.
- Módulo de consistencia del diseño.
- Módulo conductor / vehículo.
- Módulo de revisión y diagnóstico de intersecciones.
- Módulo de revisión de la aplicación de las normas.

3: *IHSDM: Interactive Highway Safety Design Model; Modelo Interactivo de Diseño de Seguridad Vial.*

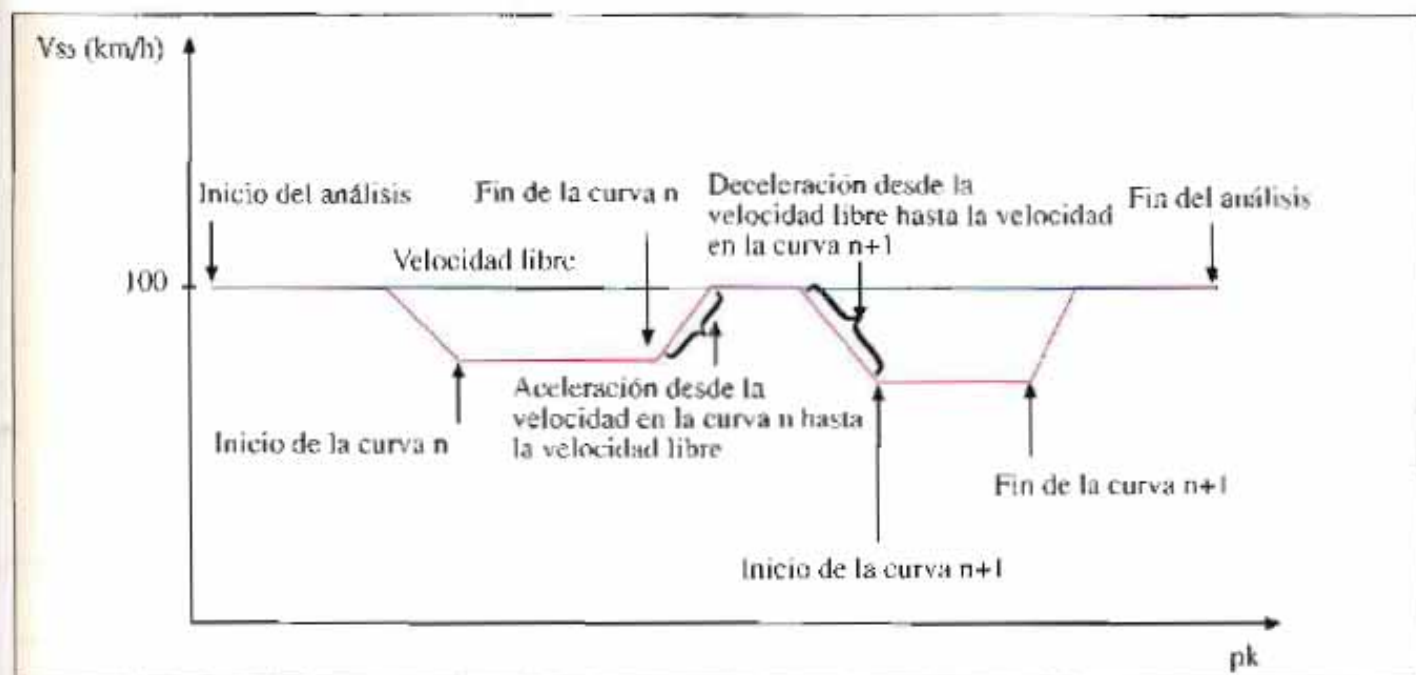


Figura 2. Perfil de velocidades por efecto de la curvatura horizontal.

- Módulo de análisis del tráfico.

Actualmente se encuentra en pleno desarrollo. La versión de prueba de que se dispone hoy en día tiene habilitados los módulos de predicción de accidentes, de consistencia del trazado y de revisión de la aplicación de las normas en carreteras de dos carriles. La versión aplicable a carreteras de más de un carril para el sentido considerado está prevista para el año 2006.

Método de evaluación del IHSDM

El módulo de consistencia del IHSDM fundamenta su evaluación en el análisis del perfil de las velocidades a lo largo del trazado y en su comparación con la velocidades específicas de proyecto (V_p); así como en la comparación de las velocidades entre elementos consecutivos en planta.

El perfil de velocidades se construye estimando el percentil 85 de la distribución de la velocidad (V_{85}).

La evaluación se hace para cada uno de los dos sentidos de avance. Los resultados se pre-

sentan de manera gráfica (perfil de velocidades) y en tablas.

A continuación, se resume el procedimiento de determinación del perfil de velocidades.

Determinación del perfil de velocidades

El perfil de velocidades representa el percentil 85 de la velocidad (V_{85}) de un vehículo a lo largo del tramo en estudio, y se obtiene de acuerdo con el siguiente método [4]:

- Selección de la velocidad libre. Es la velocidad escogida por el conductor para desplazarse en tramos rectos de gran longitud, libre de la influencia de las curvas horizontales y verticales y del tráfico. Depende del criterio del calculista, que deberá basarse en las condiciones del medio y en las características de la carretera y de sus usuarios. Por defecto, la velocidad libre que toma el programa es de 100 km/h (en el programa se la denomina "velocidad deseada").

- Cálculo de V_{85} en cada curva horizontal, usando ecuaciones empíricas basadas en datos tomados en diferentes lugares de Estados Unidos [1]. La velocidad en cada curva es función de su radio, y se

asume que permanece constante a lo largo de ella.

- Ajuste de V_{85} por aceleración y deceleración. Se compara la distancia disponible entre curvas con la longitud requerida para acelerar desde la primera, sumada a la longitud de desaceleración para entrar en la curva siguiente. Si la recta no es suficientemente larga, no se alcanza la velocidad libre; por tanto, el perfil de velocidades no llegaría hasta ese valor, lo que es muy frecuente en vías con trazados poco generosos (figura 2).

- Cálculo de la velocidad teniendo en cuenta las inclinaciones de la rasante usando las ecuaciones del TWOPAS (modelo de simulación del tráfico en carreteras rurales de dos carriles desarrollado en Estados Unidos). Se genera un segundo perfil de velocidades, como el indicado en la figura 3.

- Cálculo del perfil de velocidad definitivo: se comparan los dos perfiles de velocidades (por curvaturas horizontal y vertical) y se selecciona el menor valor de la velocidad en cada elemento, obteniendo el perfil definitivo (figura 4).

- Ajuste de las velocidades en los extremos del tramo: la velocidad al comienzo y al final del tra-

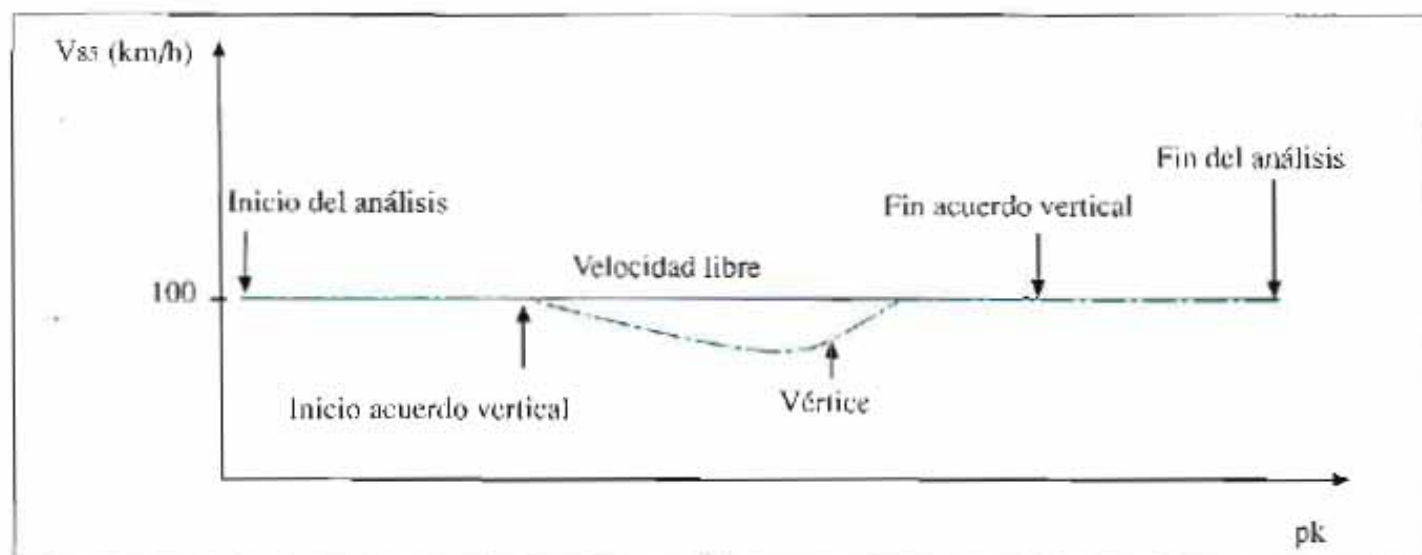


Figura 3. Perfil de velocidades por efecto de la curvatura vertical.

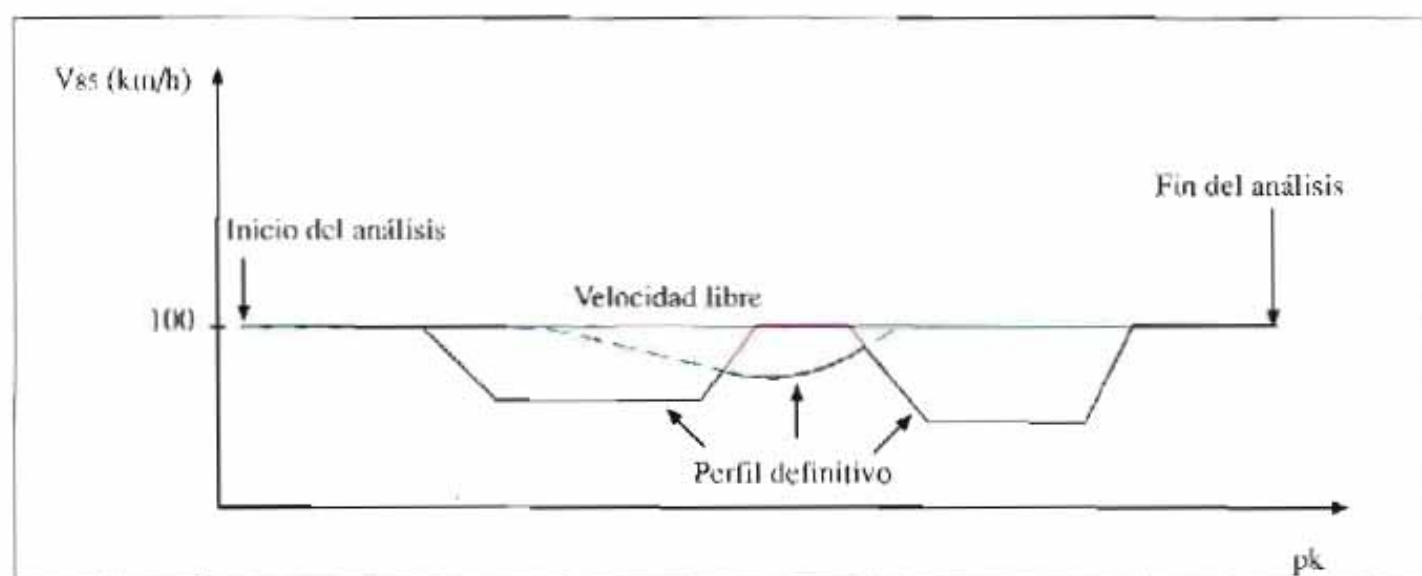


Figura 4. Perfil de velocidades definitivo.

mo puede verse afectada por la proximidad de elementos tales como intersecciones con o sin semáforos, glorietas, zonas urbanas u otros. El programa aplica unas desaceleraciones para ajustar el perfil a las velocidades en los extremos del tramo (que deben haber sido previamente suministradas por el usuario).

Una vez determinado el perfil de velocidades, el módulo de consistencia del IHSDM procede a su evaluación, como se detalla a continuación.

Evaluación de la consistencia del trazado

Se efectúa mediante dos indicadores:

- La diferencia entre la V_{85} y la velocidad de proyecto de la carretera.

- La diferencia de velocidades entre dos elementos consecutivos.

Comparación con la velocidad de proyecto

El módulo compara V_{85} con la velocidad de proyecto de la carretera (V_p) y clasifica su diferencia en cuatro intervalos (que denomina condiciones):

- Condición 1: $0 \text{ km/h} \leq (V_{85} - V_p) \leq 10 \text{ km/h}$
- Condición 2: $10 \text{ km/h} < (V_{85} - V_p) \leq 20 \text{ km/h}$
- Condición 3: $20 \text{ km/h} < (V_{85} - V_p)$
- Condición 4: $(V_{85} - V_p) < 0 \text{ km/h}$

El programa representa gráficamente estos intervalos asignan-

do distintos colores al perfil de velocidades (figura 5). Así, diferencias de más de 20 km/h se representan en color rojo, y sugieren que el asumir que la mayor parte de los vehículos viajan a unas velocidades cercanas a la de proyecto puede ser falso. En este caso debe chequearse el trazado para cerciorarse de que las características de la carretera corresponden a las velocidades de recorrido esperadas.

Unas diferencias entre 10 y 20 km/h se representan en color amarillo en el perfil de las velocidades, y corresponden a unas situaciones que deberían ser revisadas por el proyectista. Unas diferencias menores que 10 km/h

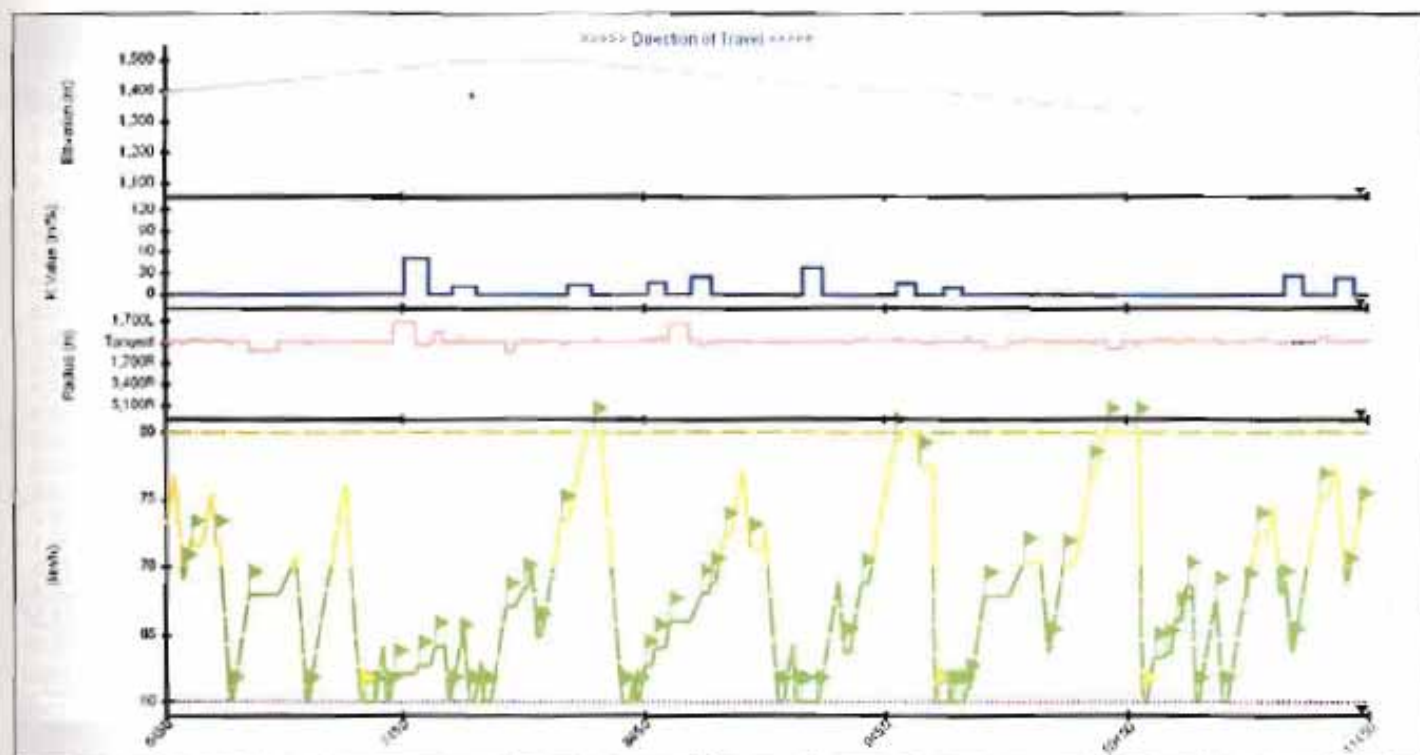


Figura 5. Resultados gráficos M-629, p.k. 6.450 a 11.450. Sentido Miraflores de la Sierra - Canencia.

se representan en color verde, y sugieren unas condiciones más favorables, así como que la velocidad de proyecto es un buen estimador de la velocidad de recorrido de los vehículos.

Comparación de la velocidad entre elementos consecutivos

Es el indicador más importante en la medida de la consistencia en carreteras de dos carriles, y se refiere a la variación de la V_{85} entre dos elementos consecutivos en planta. El programa clasifica la diferencia entre la V_{85} de dos elementos consecutivos (tanto al pasar de recta a curva como en el caso de dos curvas consecutivas) en tres intervalos (que denomina condiciones):

- Condición 1: $(V_{85} \text{ en recta} - V_{85} \text{ en curva}) \leq 10 \text{ km/h}$
- Condición 2: $10 \text{ km/h} < (V_{85} \text{ en recta} - V_{85} \text{ en curva}) \leq 20 \text{ km/h}$
- Condición 3: $20 \text{ km/h} < (V_{85} \text{ en recta} - V_{85} \text{ en curva})$

En el perfil de velocidades, IHSDM coloca banderas coloreadas que indican en qué intervalo se encuentra la diferencia de velocidades entre elementos consecutivos (figura 5): las banderas rojas in-

dican cambios de velocidad de más de 20 km/h; las amarillas, cambios entre 10 y 20 km/h, y las verdes cambios inferiores a 10 km/h.

Hay que reseñar que, según la bibliografía consultada, la tasa de accidentes en curvas con bandera roja es seis veces mayor que en aquellas donde no se requiere reducir la velocidad (curvas con bandera verde) [8].

Salidas de resultados

IHSDM presenta, para cada sentido, los resultados gráficamente y mediante tablas. A título de ejemplo, en la figura 5 y en las tablas 1, 2 y 3 se recogen parte de los resultados gráficos y numéricos correspondientes a una de las carreteras cuya consistencia se ha analizado [7]. Por la longitud del tramo estudiado y para facilitar su visualización, se presenta únicamente el gráfico correspondiente a su parte central, que es la de mayor variabilidad: del p.k. 6.450 al 11.450.

En la parte superior de la figura 5 se representan esquemáticamente el perfil longitudinal de la carretera (en gris claro), el parámetro K de los acuerdos (en azul) y la ubi-

cación y el radio de las curvas horizontales (en salmón).

En la parte inferior de la figura 5 aparece el perfil de las velocidades (en este caso en colores verde y amarillo), flanqueado por dos líneas horizontales que representan: la superior, la velocidad libre (80 km/h); y la inferior, la velocidad de proyecto (60 km/h). Sobre el perfil de las velocidades aparecen las banderas que indican el cambio de velocidad entre elementos consecutivos.

En este caso, el perfil de las velocidades muestra una gran variación, con tramos de velocidades bajas alternados con otros de mayores velocidades. Aproximadamente, un 40% del perfil de velocidades es de color amarillo, lo que indica que difiere entre 10 y 20 km/h de la velocidad de proyecto: una situación que genera inseguridad, ya que los vehículos circulan a velocidades superiores a las que rigen los parámetros geométricos de la carretera.

Si bien algunas de las banderas son de color amarillo, la mayoría es de color verde, lo que indica, en general, una buena co-

Tabla 1. Perfil de las velocidades M-629. Sentido Miraflores de la Sierra - Canencia

p.k.	V ₈₅ km/h	p.k.	V ₈₅ km/h	p.k.	V ₈₅ km/h	p.k.	V ₈₅ km/h	p.k.	V ₈₅ km/h	p.k.	V ₈₅ km/h	p.k.	V ₈₅ km/h
6488,110	76,8	7383,158	60,0	7915,054	67,0	8635,202	65,9	9352,529	68,7	10124,191	63,6	10748,957	60,0
6522,750	69,1	7392,676	60,0	7949,721	68,4	8685,928	68,0	9379,939	68,7	10126,338	63,6	10816,289	67,4
6525,885	69,1	7410,076	62,0	7969,256	68,4	8719,067	68,0	9490,400	79,2	10188,423	70,1	10822,21*	67,4
6555,981	72,1	7499,051	62,0	7986,201	70,1	8729,733	68,8	9512,841	79,2	10232,996	70,1	10845,212	60,0
6558,119	71,6	7513,451	62,6	8008,422	64,8	8750,248	68,8	9521,986	80,0	10303,074	76,8	10866,536	60,0
6604,926	71,6	7564,044	62,6	8021,056	64,8	8784,105	72,2	9582,358	80,0	10320,287	76,8	10936,866	67,7
6645,195	75,4	7580,544	64,1	8106,779	73,4	8808,906	72,2	9594,787	77,4	10356,053	80,0	10942,979	67,7
6662,591	71,6	7620,368	64,1	8136,663	73,4	8862,024	77,2	9652,269*	77,4	10506,11*	80,0	10987,924	72,2
6679,315*	71,6	7623,376	64,2	8208,568	80,0	8888,789	71,3	9658,825	60,0	10516,585	60,0	11033,611	72,2
6722,480	60,0	7639,493	60,0	8270,638	80,0	8942,085	71,3	9713,396	60,0	10535,433	60,0	11057,996	74,5
6731,402	60,0	7648,185	60,0	8357,058	60,0	8955,132	72,6	9723,156	61,1	10564,237	63,3	11087,103	67,9
6803,362	67,9	7683,085	63,9	8390,723	60,0	9006,688	60,0	9727,372	60,0	10604,896	63,3	11098,445	67,9
6927,519	67,9	7689,585	63,9	8407,845	62,0	9027,837	60,0	9778,094	60,0	10607,007	63,5	11109,436	69,0
7002,583	70,8	7702,286	65,3	8415,241	60,0	9065,524	64,2	9785,733	60,9	10632,267	63,5	11131,536	63,6
7046,280	60,0	7722,849	60,0	8427,303	60,0	9081,805	60,0	9798,286	60,9	10657,513	66,2	11136,063	63,6
7052,426	60,0	7748,163	60,0	8450,740	62,7	9175,752	60,0	9861,900	67,8	10658,855	65,9	11250,061	75,1
7208,203	76,0	7773,916	62,9	8481,789	62,7	9225,000	65,2	9961,750	67,8	10673,408	65,9	11285,183	75,1
7275,499	60,0	7785,041	60,0	8493,301	63,9	9258,122	68,9	10025,073	70,3	10699,121	68,6	11317,561	77,5
7332,388	60,0	7813,693	60,0	8538,866	63,9	9279,832	63,6	10089,458	70,3	10720,78*	68,6	11356,493	68,9
7367,842	64,0	7877,122	67,0	8556,973	65,9	9304,206	63,6	10094,477	70,8	10731,148	60,0	11363,807	68,9

* Hay desaceleración incómoda: más de 4,5 (km/h)/s en los p.k. marcados con asterisco.

Tabla 2 Comparación entre V₈₅ y V_p. M-629, Sentido Miraflores de la Sierra - Canencia

p.k.		V ₈₅ - V _p (km/h)		Condición	p.k.		V ₈₅ - V _p (km/h)		Condición
de	a	Mínimo	Máximo		de	a	Mínimo	Máximo	
6417,428	6518,644	10,0	16,8	2	8965,763	9225,000	0,0	10,0	1
6518,644	6535,082	9,1	10,0	1	9225,000	9393,203	3,6	10,0	1
6535,082	6685,237	10,0	15,4	2	9393,203	9655,066	10,0	20,0	2
6685,237	6981,630	0,0	10,0	1	9655,066	10017,479	0,0	10,0	1
6981,630	7005,903	10,0	10,8	2	10017,479	10097,785	10,0	10,8	2
7005,903	7149,612	0,0	10,0	1	10097,785	10187,160	3,6	10,0	1
7149,612	7233,515	10,0	16,0	2	10187,160	10511,350	10,0	20,0	2
7233,515	7985,235	0,0	10,0	1	10511,350	10965,888	0,0	10,0	1
7985,235	7986,607	10,0	10,1	2	10965,888	11077,913	10,0	14,5	2
7986,607	8072,805	4,8	10,0	1	11077,913	11199,160	3,6	10,0	1
8072,805	8313,848	10,0	20,0	2	11199,160	11351,437	10,0	17,5	2
8313,848	762,033	0,0	10,0	1	11351,437	11375,204	8,9	10,0	1
8762,033	8965,763	10,0	17,2	2	11375,204	11492,314	10,0	17,8	2

ordinación entre elementos consecutivos.

El perfil de velocidades no sólo se presenta gráficamente; además IHSDM genera una tabla con información numérica que es particularmente interesante, pues en ella, se señalan con un asterisco las situaciones de desaceleración forzada. Se entiende que hay desaceleración forzada o incómoda cuando se sobrepasan los 4,5 (km/h)/s. En la *tabla 1* se han recogido los valores del perfil de velocidades correspondientes al tramo de la *figura 5*.

Así mismo, se muestran en la *tabla 2* los resultados correspondientes a la diferencia entre V₈₅ y V_p.

La *tabla 3* presenta la comparación de velocidades entre elementos adyacentes. Por brevedad, se han reflejado solamente los puntos que se encuentran en condición diferente a la 1.

Estudio de la consistencia con IHSDM

Con el objetivo de efectuar una primera evaluación de la aplicabilidad del módulo de consistencia del IHSDM, se ha estudiado el trazado de tres carreteras. La selección de dichas carreteras se realizó teniendo en cuenta la dife-

renciación de los tipos de relieve empleada por las normas estadounidenses. Así, se escogió una carretera en la Comunidad de Madrid por cada uno de los tres tipos de terreno identificados en ellas: llano, ondulado y montañoso.

La carretera seleccionada en terreno llano fue la M-221, de Carabancha a Estremera (*figuras 6 y 7*). Se encuentra en la parte suroeste de la Comunidad de Madrid, con una altitud media de 700 m, y cruza las carreteras M-230, M-231 y M-222. Se han estudiado únicamente los 5 km finales (desde el cruce con la M-222 hasta Estremera), ya que el primer tramo se localiza en terreno ondulado.

Tabla 3. Comparación de la velocidad entre elementos consecutivos. M-629.
Sentido Miraflores de la Sierra -Canencia

p.k. de máxima velocidad en el elemento precedente	Máxima velocidad en el elemento precedente	P.k. de inicio de la curva	Velocidad en la curva (km/h)	Diferencia de velocidades (km/h)	Condición
757,797	75,5	778,797	60,0	15,5	2
1141,641	71,3	1157,595	60,0	11,3	2
7208,203	76,0	7275,499	60,0	16,0	2
9652,269	77,4	9658,825	60,0	17,4	2
10506,115	80,0	10516,585	60,0	20,0	2
15005,231	70,2	15014,485	60,0	10,2	2
16651,541	80,0	16653,858	60,0	20,0	2

El trazado en el tramo estudiado (del p.k. 7.850 al p.k. 12.795) no presenta problemas serios de consistencia, ya que no hay variaciones de velocidad significativas entre elementos consecutivos.

En más del 50% del tramo (considerando los dos sentidos) V_{re} supera entre 10 y 20 km/h la velocidad de proyecto. Esta situación, si bien no es deseable desde el punto de vista de la seguridad y la consistencia del trazado, tampoco es crítica, por lo que no requiere una intervención inmediata.

Los principales problemas detectados son la presencia de curvas de radio pequeño entre rectas largas, y la disparidad de los radios de curvatura, ya que se encuentran valores desde 150 m (que no cumplen con la norma) hasta casi 11 000 m.

Sería recomendable buscar una mayor proximidad entre la velocidad de recorrido y la de proyecto (90 km/h), distantes entre sí más de 10 km/h en buena parte del tramo. Para ello, convendría aumentar los radios de menos de 500 m y evitar las rectas largas.

Para el estudio en un terreno ondulado, se seleccionó el tramo Colmenar Viejo - Cercada de la carretera M-607 (figura 8). Se encuentra al noroeste de la ciudad de Madrid y tiene una longitud de 12 km. Se trata de una alternativa de acceso a la Sierra madrileña, por tanto de interés turístico y recreativo, que atraviesa en parte de su recorrido el Parque Regional de la Cuenca Alta del Río Manzanares.

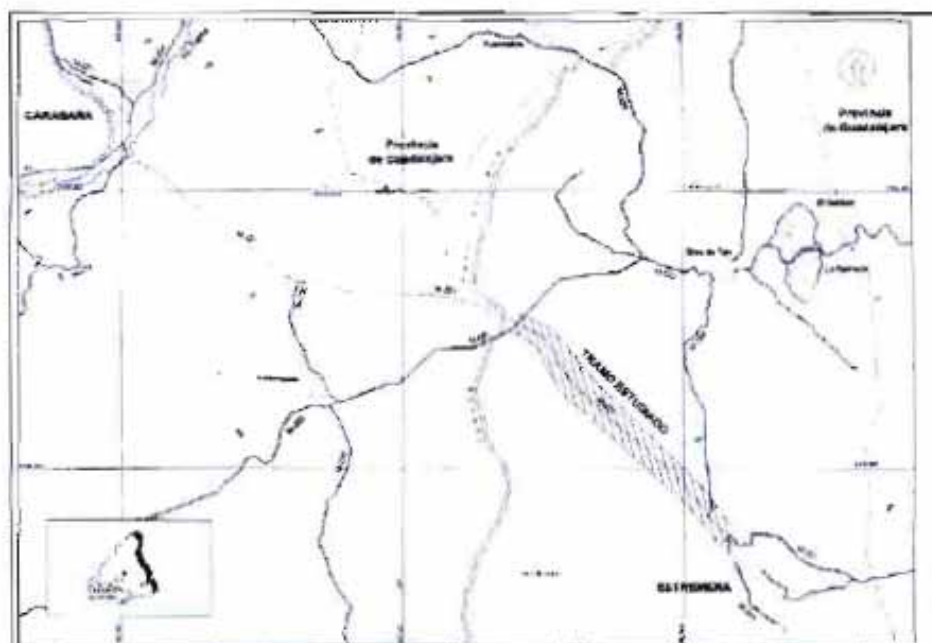


Figura 6. Localización de la carretera M-221.



Figura 7. Carretera M-221.

El IHSDM no ha detectado problemas de consistencia en el tramo estudiado. La velocidad de recorrido calculada es muy cer-

cana a la velocidad de proyecto (100 km/h) en todo el tramo, y no hay una variación brusca de la velocidad al iniciar las curvas: por

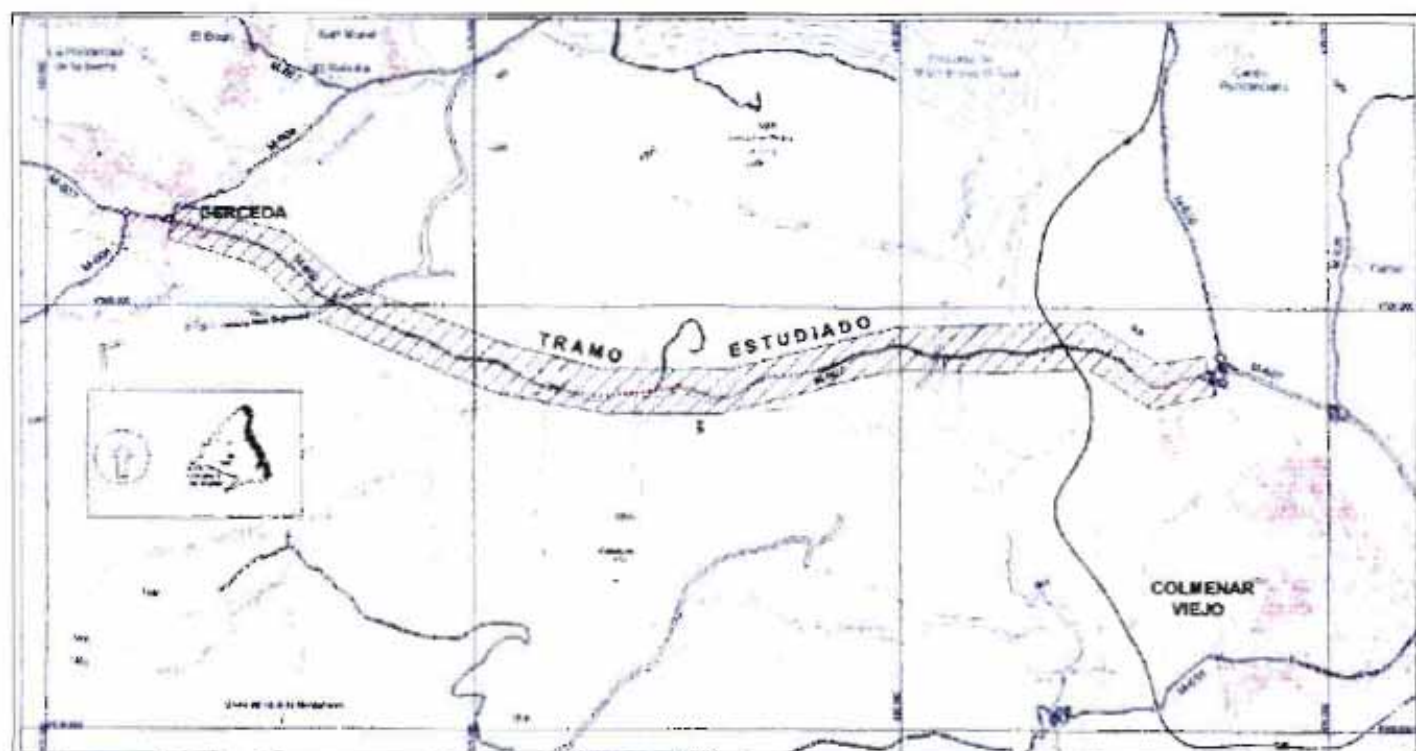


Figura 8. Localización de la carretera M-607



Figura 9. Carretera M-607.

tanto, las condiciones de circulación pueden considerarse seguras (desde el punto de vista de la consistencia del trazado).

Se han detectado algunos problemas de desaceleraciones excesivas que, si bien no comprometen la seguridad, si afectan a la comodidad en la circulación (figura 9). Esto ocurre en el p.k. 7.475, p.k. 11.372 (sentido Colmenar Viejo - Cerceda) y en los p.k. 9.964 y 6.607 en el sentido opuesto. En

todos estos casos la causa es la presencia de dos curvas consecutivas cercanas con radio muy diferente. En los tres primeros se está en el límite de la norma (de más de 2 000 m se pasa a 700 m). En el p.k. 6.607 se la incumple, pues se pasa de una curva con radio de 2 000 m a una curva de radio 500 m, cuando el radio mínimo debería haber sido 700 m.

En algunos tramos se circula por debajo de la velocidad de pro-

yecto: esto está condicionado por la presencia de curvas consecutivas de radio 450 m (p.k. 8.500) y por la subida del río Manzanares a Colmenar Viejo (5.6 %).

Con terreno montañoso, se estudió la carretera M-629, tramo Miraflores de la Sierra - Canencia (figura 10) de 17,36 km de longitud, al norte de la Comunidad de Madrid. Se trata de una vía angosta que permite el ascenso al Puerto de Canencia, en la Sierra madrileña, a 1 594 m de altitud, y desciende hasta la localidad de Canencia. Los primeros 1,4 km del trazado cruzan la zona urbana de Miraflores de la Sierra, y los últimos 500 m, la de Canencia.

El diseño del acondicionamiento del que proceden los datos de esta investigación se realizó en 1987 con base en las normas suizas, debido a sus características especiales de montaña. Por el reducido ancho de calzada (6.50 m), todo el tramo se diseñó a una sola agua, con pendiente transversal del 2% (borde izquierdo arriba) y un sobreebanco en las curvas con radio inferior a 100 m, en algunos casos a ambos lados de la vía.

El trazado cuenta con cerca de 200 curvas en planta, el 77 % de

las cuales tiene un radio inferior a 200 m, y el 3 % de más de 1 000 m. Se presenta una veintena de casos de curvas con radio menor de 30 m. Hay que destacar la presencia de dos curvas con radio 9,20 m, donde ha sido necesario colocar un sobrecancho de 5,25 m, gracias al cual prácticamente se duplica la anchura de la calzada.

El tramo estudiado (del p.k. 25 al p.k. 17 382,104) presenta problemas de consistencia en su trazado, consecuencia de la gran variación de radios de curvatura, que van desde 9,20 m (figura 1) hasta 5 000 m.

Por otra parte, se incumple la normativa vigente actualmente en España en lo concerniente a la relación entre radios de curvatura consecutivos.

IHSDB ha detectado 10 lugares que deben ser atendidos con prioridad, debido a que obligan a disminuir la velocidad entre 10 y 20 km/h con respecto al tramo inmediatamente anterior, una situación reconocida como potencialmente peligrosa. Por ejemplo, en el paso de una curva de radio 250 a otra de radio 9,20 m en el p.k. 10,506 (figura 1) IHSDB calcula un diferencia de 20 km/h.

En el sentido Miraflores de la Sierra - Canencia, la primera medida de mejora que se debería emprender sería incrementar el radio de las curvas que comienzan en los siguientes p.k.: 779, 1 158, 7 275, 9 659 (figura 11), 10 517 (figura 1), 15 014 y 16 654. En los casos en que los costes sean excesivamente altos, debería estudiarse alguna medida para reducir la velocidad en el elemento inmediatamente anterior, como acortar la recta o disminuir el radio, a fin de lograr una mayor homogeneidad de velocidades entre elementos adyacentes.

En el sentido Canencia - Miraflores de la Sierra deben hacerse las mismas consideraciones en las curvas que comienzan en los p.k. 12,626; 8,482 y 257.

En el 40 % del tramo los vehículos circulan a velocidades entre 10

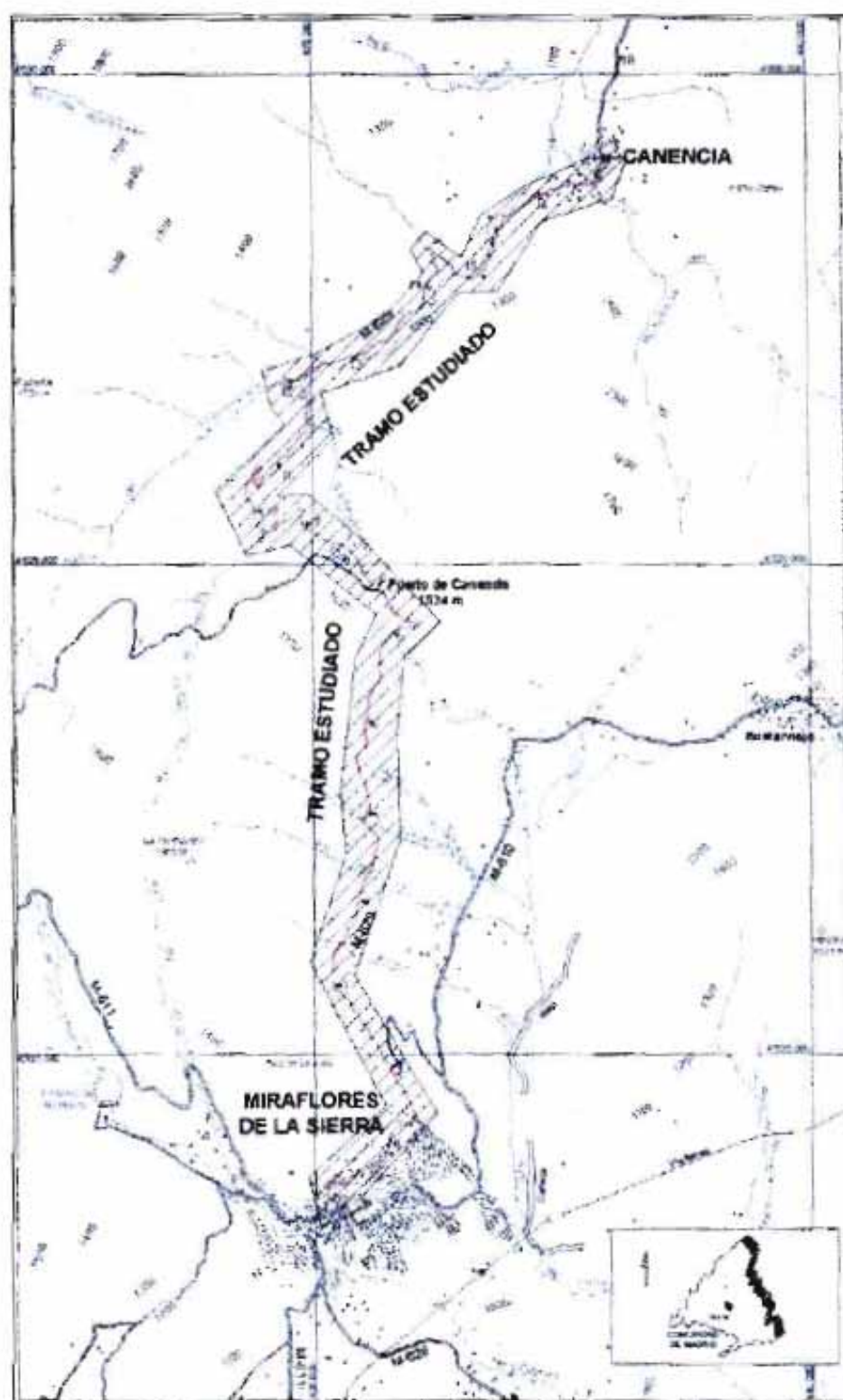


Figura 10. Localización de la carretera M-629.

y 20 km/h por encima de la velocidad de proyecto, lo que puede generar situaciones inseguras por la inconsistencia entre la velocidad de recorrido y el diseño geométrico de la carretera. Sin embargo, esta situación es difícil de solucionar debido a los altos costes que implicaría.

Desde el punto de vista de la consistencia del trazado, la situación es

más problemática en el sentido de desplazamiento de Miraflores de la Sierra a Canencia que en el sentido opuesto, debido a que, en general, en ese sentido, los radios de curvatura pasan de valores mayores a valores menores en forma no homogénea, lo que obliga a los conductores a desacelerar de manera intermitente y a veces súbita.



Figura 11. Carretera M-629: huellas de un reciente accidente en una curva de radio reducido (p.k. 9.659)

Como medida de mejora a medio plazo podría considerarse la construcción de una variante de la localidad de Miraflores de la Sierra y la mejora de los radios de curvatura menores de 200 m hasta el p.k. 4. Esto permitiría unas condiciones de circulación homogéneas hasta el inicio de la subida al Puerto de Canencia.

Por otra parte, el ascenso y descenso del Puerto sólo pueden mejorarse con una inversión económica muy alta, que merecería acometerse únicamente si las condiciones de tráfico y de importancia de la vía evolucionan favorablemente con el transcurso del tiempo.

Conclusiones

La consistencia del trazado de una carretera es un factor destacado en el diseño de ésta, debido a su demostrada influencia en la siniestralidad. Aunque está implícita en aspectos de la normativa vigente, como la relación entre radios de curvas consecutivas y la velocidad de planeamiento, el uso de procedimientos específicos para su evaluación puede facilitar y mejorar su análisis.

Fundamentalmente se pueden diferenciar dos tipos de procedi-

mientos de evaluación de la consistencia del trazado: los basados en el nivel de atención del conductor y los basados en el perfil de las velocidades, como es el caso del módulo de consistencia del IHSDM.

En la investigación realizada, el módulo de consistencia del IHSDM ha demostrado ser una herramienta informática válida para la evaluación de la consistencia del trazado cualquiera que sea la orografía del terreno. Por otra parte, el procesamiento de los datos es fácil y la interpretación de resultados clara y práctica.

Se han detectado problemas serios de inconsistencia del trazado en una de las tres carreteras estudiadas, así como situaciones de desaceleraciones incómodas en algunos puntos de las tres vías. La principal causa de dichas inconsistencias estriba en la utilización de radios de curvatura muy diferentes alternados a lo largo del trazado.

Por último, hay que reseñar que no es recomendable trabajar con los valores límite establecidos en la norma en lo referente a relación entre radios de curvas consecutivas: pues, como también se ha puesto de manifiesto en la investigación efectuada, dan origen a situaciones de conducción incómodas o inseguras, especial-

mente con desaceleraciones excesivas al iniciar la curva.

Bibliografía

- [1] FITZPATRICK, K. y otros (1999). *Speed prediction for two-lanes rural highways*. Washington: Federal Highway Administration. Report No. FHWA-RD-99-171.
- [2] GARCÍA, A. (1997). *Efectos operacionales del diseño vinculados con la seguridad*. Jornadas Técnicas Seguridad Vial y Equipamiento de la Carretera.
- [3] GEOMETRIC DESIGN LABORATORY (2001). *IHSDM Roadway Model*. Washington: Federal Highway Administration.
- [4] GEOMETRIC DESIGN LABORATORY (2001). *IHSDM Design Consistency Module Engineer's Manual*. Washington: Federal Highway Administration.
- [5] KRAMMES, A., y otros (1995). *Horizontal Alignment Design Consistency for Rural Two Lane Highways*. Washington: Federal Highway Administration. Report No. FHWA-RD94-034.
- [6] LAMM, R., PSARIANOS, B. y MAILAENDER, T. (1999). *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*. Nueva York: Mc Graw-Hill.
- [7] SÁNCHEZ, J. F. (2002) *Evaluación de la consistencia del trazado de carreteras con IHSDM* Trabajo de Investigación Tutelado llevado a cabo dentro del Programa de Doctorado del Departamento de Transportes (UPM).
- [8] VOIGT, A. (1996). *Evaluation of alternative Horizontal Curve Design Approaches on Rural Two-Lane Highways*. Texas: Texas Transportation Institute, Report No. TTI-04690-3.

Agradecimientos

A la Consejería de Obras Públicas Urbanismo y Transportes de la Comunidad de Madrid, por su colaboración al facilitar los datos de los proyectos estudiados. ■