



Trabajo Técnico: **RELACIÓN ENTRE EL DISEÑO GEOMÉTRICO DEL CAMINO Y LOS ACCIDENTES.
EFECTO DE LA COMBINACIÓN DE TRAMOS CON PENDIENTES, CURVAS VERTICALES Y HORIZONTALES EN RUTAS ARGENTINAS**

Área Temática: **SEGURIDAD VIAL**

Autores: **Raúl Fernando González** Ingeniero Civil UBA

DNI 16.535.778 – PRE-00158

Adriana Elizabeth Di Campli Ingeniero Civil UBA

DNI 25.647.008– PRE-00226

Patricia Gianina Vela Díaz Ingeniero Civil UBA

DNI 18.841.548– PRE-00186

Paula Maria Scordato Ingeniero Civil UBA

DNI 30.448.130– PRE-00175

Cátedra Diseño y Operación de Caminos

Departamento Transporte

Facultad de Ingeniería

Universidad de Buenos Aires

Av. Las Heras 2214 – Piso 2 - C1127AAR - Buenos Aires - Argentina

Tel.: (54-11) 4514-3018

rfgonzal@fi.uba.ar

transpor@fi.uba.ar

RELACIÓN ENTRE EL DISEÑO GEOMÉTRICO DEL CAMINO Y LOS ACCIDENTES. EFECTO DE LA COMBINACIÓN DE TRAMOS CON PENDIENTES, CURVAS VERTICALES Y HORIZONTALES EN RUTAS ARGENTINAS

RESUMEN

El trabajo propuesto pretende encontrar la correlación entre el diseño geométrico de un camino de dos carriles indivisos y los accidentes en un entorno rural, aplicando conceptos de seguridad vial internacionalmente aceptados.

A partir de las bases de datos accidentológicas obtenidas del SIAT de la Dirección Nacional de Vialidad y de la Agencia Nacional de Seguridad Vial, para la ruta seleccionada como caso de estudio y sobre la geometría real de la misma al momento de producirse los accidentes bajo análisis, resultan de aplicación los lineamientos establecidos en el "Highway Safety Manual - HSM".

El citado manual establece varios modelos para determinar la frecuencia y distribución de accidentes que acontecen en una carretera o en un segmento de ella como así también proporciona herramientas para llevar a cabo los análisis cuantitativos.

Este trabajo considera para las condiciones locales, el estudio no contemplado actualmente en el HSM, del efecto combinado de curvas verticales (cóncavas o convexas), o de tramos rectos con pendientes con curvas horizontales y su relación con los accidentes producidos en las mismas, encontrando los denominados Factores de Modificación de Accidentes locales (CMFs).

Mediante el análisis de los resultados, el trabajo concluye con la discusión sobre la falta de disponibilidad de normativas e investigación en la Argentina sobre estos temas y la posibilidad de mejorar el diseño vial en nuestras rutas para contribuir a evitar futuros accidentes.



ÍNDICE

- 1 INTRODUCCIÓN
- 1.1 OBJETO DEL TRABAJO
- 1.2 METODOLOGÍA DE ESTUDIO Y EVALUACIÓN
- 1.3 PAUTAS DE APLICACIÓN
- 1.4 DESCRIPCIÓN DEL HSM
- 2 CASOS DE ESTUDIO
- 2.1 ACCIDENTOLOGÍA
- 2.2 GEOMETRÍA DEL TRAMO DE ESTUDIO
- 3 ANALISIS REALIZADO
- 4 RESULTADOS Y CONCLUSIONES - RECOMENDACIONES

1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETO DEL TRABAJO

El trabajo propuesto pretende establecer una correlación entre el diseño geométrico del camino y los accidentes en rutas (caminos de dos carriles indivisos), aplicando conceptos de seguridad vial internacionalmente aceptados.

Específicamente en la relación con la combinación de curvas horizontales con tramos rectos con pendientes y curvas horizontales con curvas verticales convexas o cóncavas. Persigue además como objetivo suplementario, estudiar la posibilidad de introducir mejoras al diseño del camino, en su geometría y señalización, para influenciar de esta manera la reducción de accidentes.

1.2 METODOLOGÍA DE ESTUDIO Y EVALUACIÓN

Partiendo de las bases de datos en materia de accidentología vial para el caso de rutas nacionales en las distintas regiones del país, disponibles en la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV) y la Dirección Nacional de Vialidad DNV, y en el Sistema de Información de Accidentes de Tránsito SIAT y sobre la realidad física de la geometría del camino al momento de acaecer de los accidentes bajo análisis, resultan de aplicación los lineamientos establecidos por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en su Manual de Seguridad Vial: "Highway Safety Manual" (HSM).

1.3 PAUTAS DE APLICACIÓN

Para poder evaluar el estudio se consultaron antecedentes sobre el tema, encontrando dos enfoques, por un lado la metodología expresada en el Manual de Seguridad Vial citado y por otro lado una publicación de la Federal Highway Administration (FHWA) "Safety Effects of Horizontal Curve and Grade Combinations on Rural Two-Lane Highways"², cuyos autores son , K.M. Bauer y D.W. Harwood.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL HSM

En el Highway Safety Manual en su versión 2010 y un suplemento del año 2014 se presentan herramientas de análisis basadas en una recopilación de estudios realizados principalmente en la red de carreteras de Estados Unidos, que establecen relaciones entre las variables de infraestructura vial y la ocurrencia de accidentes.

En el HSM se establecen varios modelos para predecir la frecuencia y distribución de accidentes en carreteras rurales de dos carriles indivisos, rurales multicarril y en arteriales urbanas y suburbanas; los mismos que han sido incluidos en el software denominado “Interactive Highway Safety Design Model3 (IHSDM)”. Modelo de Diseño Interactivo para la seguridad vial.

La estimación de accidentes según el HSM se basa determinar el promedio de accidentes anuales previstos para las denominadas condiciones base y luego afectar el mismo por los denominados Factores de Modificación de Accidentes (CMFr) que corrigen ese valor y por un Factor de Calibración para ajustar a las condiciones geográficas locales (Cr).

MODELO PREDICTIVO DE ACCIDENTES DEL HSM 2010 PARA CAMINOS DE DOS CARRILES EN ZONAS RURALES

La estimación de accidentes propuesta por el HSM consta de varios algoritmos que predicen la frecuencia promedio y distribución de accidentes en caminos rurales de dos carriles, pudiendo realizarse para evaluar condiciones existentes de una ruta o para nuevos proyectos.

El método se aplica para un período de tiempo y volumen del tránsito determinado expresado en TMDA y para ciertas características geométricas del camino, que deben permanecer sin cambios durante el período de análisis.

El HSM realiza una distinción entre segmentos de camino e intersecciones, presentando modelos predictivos por separado, pero la fórmula genérica para ambos casos consta de tres elementos:

- ✓ Función de Performance de Seguridad (Nspf),
- ✓ Factores de Modificación de Accidentes (CMFr) y
- ✓ Factor de calibración (Cr).

El Factor de Modificación de Accidentes (CMF), cuantifica el cambio relativo en la frecuencia esperada de accidentes, como consecuencia de modificar alguna de las condiciones denominadas base del lugar de estudio.

Por ejemplo si la condición de referencia define que el ancho de carril es igual a 3,65 m, entonces el CMFr1 es igual a 1,00. Luego si el ancho existente es menor, el CMFr1 será mayor a 1.

Las condiciones de base, como así también el Factor de Modificación de Accidentes asociado pueden apreciarse en la siguiente tabla:

TABLA 1. Condiciones base para segmento de camino bidireccional de dos carriles indivisos

Elemento	Valor	Factor Modif Accidentes asociado
Ancho de carril	3,65 m	CMFr1
Ancho de banquina	1,80 m	CMFr2
Tipo de banquina	Pavimentada	
Curvatura horizontal	No	CMFr3
Variación de peralte	<0,01	CMFr4
Pendiente longitudinal	<3%	CMFr5
Densidad de accesos	5/mi = 3,1 acc/Km	CMFr6
Banda central sonora	No	CMFr7
Carriles de sobrepaso	No	CMFr8
Carriles de giro izquierda bidireccionales	No	CMFr9
Índice de peligrosidad del costado del camino	3	CMFr10
Iluminación	No	CMFr11
Control de velocidad automática por cámaras o radar	No	CMFr12

Fuente: Reproducción en base a tabla 10.6.1 del Highway Safety Manual 2010. 1st Ed. Vol 2. Cap 10

Nótese que para la condición de referencia no hay curvas horizontales y el efecto de las mismas está dado por el Factor CMFr3 y las pendiente longitudinal del camino base es menor al 3% y su factor asociado es el CMFr5.

Se destaca que no está determinado en el HSM, el efecto de la presencia de una curva vertical en un tramo recto en planimetría, ni el efecto de la combinación de tramos con curvas horizontales y verticales.

Por otra parte la Función de Performance de Seguridad (Nspf), que predice los accidentes en el lugar de estudio suponiendo las condiciones de base, está expresada por la siguiente fórmula:



$$N_{spf} = TMDA \times L \times 365 \times 10^{-6} \times e^{(-0,312)}$$

siendo:

N_{spf} : predicción de frecuencia total de accidentes para segmentos en condiciones “base”

TMDA: Tránsito medio diario anual (veh/día)

L: longitud del segmento de camino (millas)

Conforme a lo expuesto, la expresión que predice los accidentes en el lugar de estudio con sus condiciones reales, será:

$$N_{predicted} = N_{spf} \times (CMF1r \times CMF2r \times CMF3r \times CMF4r \times CMF5r \times CMF6r \times CMF7r \times CMF8r \times CMF9r \times CMF10r \times CMF11r \times CMF12r) \times Cr$$

donde:

$N_{predicted\ rs}$: predicción de frecuencia promedio de accidentes para un segmento individual de camino en un año específico. (accidentes/año)

$N_{spf\ rs}$: predicción de frecuencia promedio de accidentes para condiciones “base” de un segmento individual de camino.

El CM_{F10} que responde al Índice de Peligrosidad (IP) en “condición base” con IP=3, resulta $CMF=1$. El HSM detalla la fórmula de cálculo.

En relación a los índices de Peligrosidad resulta interesante destacar la tabla siguiente:

IND. PELIG.	Zona despejada*	Talud	Costado del Camino		
			Superficie	Guardarail	Obstáculos
1	≥ 9m	1V:4H o más tendido; recuperable	---	---	---
2	6 – 7,5 m	Alrededor 1V:4H; recuperable	---	---	---
3	≈ 3 m	1V:3H – 1V:4H; marginalmente recuperable	Rugosa, desapareja	---	---
4	1,5 – 3 m	1V:3H – 1V:4H; marginalmente indulgente con chance de colisión	---	puede tener a 1,5 - 2 m *	puede tener árboles, postes, etc sin proteger a 3 m *
5	1,5 – 3 m	1V:3H prácticamente no recuperable	---	puede tener a 0 – 1,5 m *	Obstáculos rígidos o terraplén a 2 - 3 m*
6	≤ 1,5 m	1V:2H; No recuperable	---	No tiene	Obstáculos rígidos a 0 - 2 m*
7	≤ 1,5 m	1:2 o más pronunciada; No recuperable con alta probabilidad de lesión por colisión	---	No tiene	precipicio o corte en roca

*Desde línea de borde de pavimento

Fuente: EVALUACIÓN DE ÍNDICES DE PELIGROSIDAD, María Graciela Berardo - Rodolfo Guillermo Freire - Paula Marchesini - Mauro Iván Tartabini - Gustavo Daniel Vanoli - Agustín Casares - Universidad Nacional de Córdoba- XVI CONGRESO ARGENTINO DE VIALIDAD Y TRÁNSITO OCTUBRE DE 2012 – CÓRDOBA, ARGENTINA

Respecto al Factor de Calibración Cr, el HSM sugiere que para obtener un valor adecuado de mismo se utilice una muestra de 30 a 50 sitios, los cuales deben sumar 100 accidentes (independientemente de la severidad) por año como mínimo (total de todos los sitios) y tener una longitud mínima recomendada de cada sitio de 160 metros (0,1 millas), suficiente para representar adecuadamente las condiciones físicas y de seguridad del lugar en proceso de calibración.

El factor de calibración Cr (en este caso, para segmentos de dos carriles indivisos) se obtiene como el cociente entre la sumatoria de la frecuencia de accidentes observada para todos los sitios de la muestra y la sumatoria de la frecuencia de accidentes esperada en los mismos sitios

$$Cr = \Sigma N_{obs} / \Sigma N_{pred}$$

Para el cálculo de la frecuencia de accidentes esperada Npred para cada uno de los sitios en estudio se calculan los CMF correspondientes y se asume un Cr igual a uno.

Cálculo de los CMF considerando la combinación de curvas horizontales y verticales

Como se citó en este trabajo se consideran los lineamientos aportados por K.M. Bauer y D.W. Harwood en su trabajo "Efectos de seguridad de combinaciones de curvas horizontales y verticales en las caminos rurales de dos carriles"

Es así que la metodología propuesta por los autores toma la nomenclatura del Capítulo 3 del Manual "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets" editado en el año 2011 por AASTHO⁴. Los tramos de carretera recta, sin curvaturas horizontales se refieren generalmente como "tangentes" porque dichos tramos de carretera rectas son tangentes a las curvas horizontales que colindan.

Los parámetros fundamentales de diseño de curvas horizontales incluyen los siguientes:

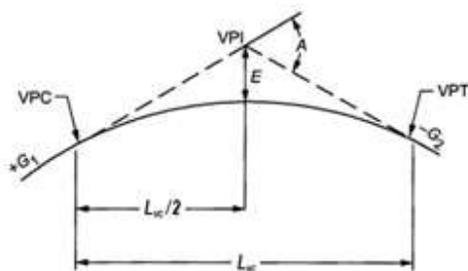
- Radio de curvatura.
- Longitud de la curva.
- Peralte.
- Diseño de la Transición.

Los efectos de seguridad, tanto de radio y la longitud de las curvas horizontales se abordan en CMF desarrollado en este estudio.

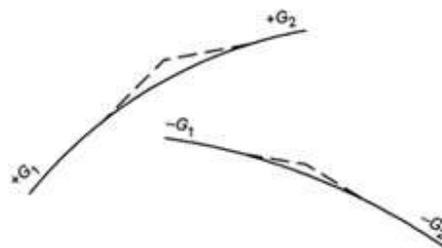
El parámetro fundamental de diseño para la alineación vertical es la pendiente medida en por ciento. Un tramo de carretera con un pendiente expresada en por ciento constante, independientemente de su alineación horizontal, se conoce generalmente como una recta. Cuando la pendiente de la carretera cambia, las secciones rectas están normalmente unidas por una curva vertical parabólica.

La Figura siguiente, traducida de la publicación original de AASHTO "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets", ilustra los cuatro tipos de curvas verticales (dos tipos de curvas verticales convexas y dos tipos de curvas verticales cóncavas) que se utilizan en el diseño de carreteras. Los parámetros fundamentales de diseño de curvas verticales incluyen los siguientes:

- Diferencia algebraica (A) entre las tangentes (i_1) y (i_2) en por ciento.
- Longitud de la curva (LVC).
- K, la relación de LVC y A, representa una medida de la severidad de la curva vertical.



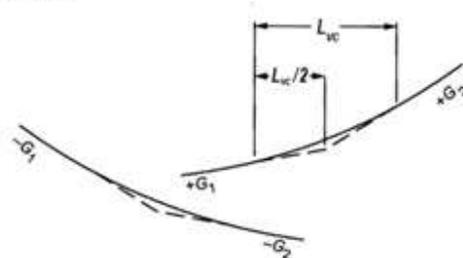
Curva convexa Tipo I



Curva convexa Tipo II



Curva cóncava Tipo I



Curva cóncava Tipo II

G1;G2: pendientes tangenciales (%)

A: diferencia algebraica (angular)

Lvc: longitud de la curva

E: externa

Efectos de la curva horizontal y combinaciones de pendientes en carreteras de dos carriles rurales.

La metodología utiliza una base de datos del “Highway Safety Information System” (HSIS) relevados en las carreteras rurales de dos carriles del Estado de Washington, que incluye los datos geométricos, de tránsito y de accidentes.

La base de datos de accidentes para el estudio citado fue de un período de 6 años (2003 a 2008), con el análisis de 3.457 millas (5531 km) de carreteras rurales.

Los efectos de seguridad de curva horizontal y combinaciones de pendientes el estudio un enfoque de modelo lineal generalizado suponiendo una distribución binomial negativa de la cantidad de accidentes y un modelo exponencial utilizando los datos de accidentes y geométricos de las carreteras seleccionadas.

La cantidad de accidentes con muertos y heridos (FI) y la de accidentes con sólo daños materiales (PDO), en el estudio realizado en Washington, fueron modelados por separado para cada uno de los cinco tipos de combinaciones de curvas horizontales y verticales y pendientes, según:

- Curva horizontal con tramo con pendiente
- Curva horizontal con Curva vertical Convexa Tipo I
- Curva horizontal con Curva vertical Cóncava Tipo I
- Curva horizontal con Curva vertical Convexa Tipo II
- Curva horizontal con Curva vertical Cóncava Tipo II

Cada uno tiene CMF un valor nominal de 1,0 para una condición de base especificada en el HSM ya citada.

CMF con un valor mayor que 1,0 representa una condición en la cual se estima una mayor cantidad de accidentes que la correspondiente a la condición de base. CMF con un valor inferior a 1,0 representa una condición para la cual el número de accidentes se estima menor que para el estado base.

Para cada combinación tipo citada (así como cada tipo accidentes FI y PDO), se predicen mediante algoritmos los CMF en relación a la condición base, es decir sin curva horizontal y pendiente menor al 3%.

Definiendo los siguientes parámetros para las combinaciones de curvas H (horizontal) y V (vertical) se presentan las siguientes posibilidades:

Parámetro	Descripción	Unidad	Unidad
G_1	Pendiente inicial (con signo)	%	%
G_2	Pendiente Final (con signo)	%	%
R	Radio de Curva	m	ft
$L_C = D$	Longitud de Curva Horizontal	m	mi
L_{VC}	Longitud de Curva Vertical	m	ft
P_{FI}	Proporción de accidentes fatales y Heridos (FI) medio por año	Ninguna	Ninguna
P_{PDO}	Proporción de accidentes con sólo daños materiales (PDO) medio por año	Ninguna	Ninguna

(P_{FI} por defecto es 0,321)

Las expresiones utilizadas se toman de la publicación citada y se transcriben a continuación:

CMFs para Curvas Horizontales y tangentes en tramos con pendientes

$$CMF_{30,FI} = \begin{cases} \exp\left[0.044G + 0.19 \ln\left(2 \times \frac{5,730}{R}\right) + 4.52 \left(\frac{1}{R}\right) \left(\frac{1}{L_C}\right)\right] & \text{for horizontal curves} \\ \exp[0.044G] & \text{for tangents on nonlevel grades} \\ 1.0 & \text{for level tangents (base condition)} \end{cases}$$

Figure 2. Equation. FI CMF for horizontal curves and tangents on straight grades.

$$CMF_{30,PDO} = \begin{cases} \exp\left[0.040G + 0.13 \ln\left(2 \times \frac{5,730}{R}\right) + 3.80 \left(\frac{1}{R}\right) \left(\frac{1}{L_C}\right)\right] & \text{for horizontal curves} \\ \exp[0.040G] & \text{for tangents on nonlevel grades} \\ 1.0 & \text{for level tangents (base condition)} \end{cases}$$

Figure 3. Equation. PDO CMF for horizontal curves and tangents on straight grades.

Fuente: Reproducción de Safety Effects of Horizontal Curve and Grade Combinations on Rural Two-Lane Highways, Bauer, K.M. and Harwood, D.W. (2013)

CMFs para Curvas Horizontales y tangentes con tramos con curvas convexas Tipo 1 y Tipo 2

CMFs for horizontal curves and tangents at type 1

$$CMF_{Cl,T} = \begin{cases} \exp \left[0.0088 \left(\frac{5,730}{R} \right) \frac{L_{TC}}{K} \right] & \text{for horizontal curves} \\ 1.0 & \text{for tangents at type 1 crests} \\ 1.0 & \text{for level tangents (base condition)} \end{cases}$$

Figure 4. Equation. FI CMF for horizontal curves and tangents at type 1 crest vertical curves.

$$CMF_{Cl,PDO} = \begin{cases} \exp \left[0.0046 \left(\frac{5,730}{R} \right) \frac{L_{TC}}{K} \right] & \text{for horizontal curves} \\ 1.0 & \text{for tangents at type 1 crests} \\ 1.0 & \text{for level tangents (base condition)} \end{cases}$$

Figure 5. Equation. PDO CMF for horizontal curves and tangents at type 1 crest vertical curves.

$$CMF_{Cl,PDO} = \begin{cases} \exp \left[0.10 \ln \left(2 \times \frac{5,730}{R} \right) \right] & \text{for horizontal curves} \\ 1.0 & \text{for tangents at type 2 crests} \\ 1.0 & \text{for level tangents (base condition)} \end{cases}$$

Figure 9. PDO CMF for horizontal curves and tangents at type 2 crest vertical curves.

CMFs para Curvas Horizontales y tangentes con tramos con curvas cóncavas Tipo 1 y Tipo 2

The CMFs for horizontal curves and tangents at type 1

$$CMF_{Cl,T} = \begin{cases} \exp \left[10.51 \frac{1}{K} - 0.011 \left(\frac{5,730}{R} \right) \frac{L_{TC}}{K} \right] & \text{for horizontal curves} \\ \exp \left[10.51 \frac{1}{K} \right] & \text{for tangents at type 1 sags} \\ 1.0 & \text{for level tangents (base condition)} \end{cases}$$

Figure 6. Equation. FI CMF for horizontal curves and tangents at type 1 sag vertical curves.

The CMFs for horizontal curves and tangents at type 2

$$CMF_{Cl,T} = \begin{cases} \exp \left[0.188 \ln \left(2 \times \frac{5,730}{R} \right) \right] & \text{for horizontal curves} \\ 1.0 & \text{for tangents at type 2 sags} \\ 1.0 & \text{for level tangents (base condition)} \end{cases}$$

Figure 10. Equation. FI CMF for horizontal curves and tangents at type 2 sag vertical curves.

$$CMF_{Cl,PDO} = \begin{cases} \exp \left[8.62 \frac{1}{K} - 0.010 \left(\frac{5,730}{R} \right) \frac{L_{TC}}{K} \right] & \text{for horizontal curves} \\ \exp \left[8.62 \frac{1}{K} \right] & \text{for tangents at type 1 sags} \\ 1.0 & \text{for level tangents (base condition)} \end{cases}$$

Figure 7. Equation. PDO CMF for horizontal curves and tangents at type 1 sag vertical curves.

$$CMF_{Cl,PDO} = \begin{cases} \exp \left[0.022 \left(\frac{5,730}{R} \right) A \right] & \text{for horizontal curves} \\ 1.0 & \text{for tangents at type 2 sags} \\ 1.0 & \text{for level tangents (base condition)} \end{cases}$$

Figure 11. Equation. PDO CMF for horizontal curves and tangents at type 2 sag vertical curves.

The CMFs for horizontal curves and tangents at type 2

$$CMF_{Cl,T} = \begin{cases} \exp \left[0.20 \ln \left(2 \times \frac{5,730}{R} \right) \right] & \text{for horizontal curves} \\ 1.0 & \text{for tangents at type 2 crests} \\ 1.0 & \text{for level tangents (base condition)} \end{cases}$$

Figure 8. Equation. FI CMF for horizontal curves and tangents at type 2 crest vertical curves.

Fuente: Safety Effects of Horizontal Curve and Grade Combinations on Rural Two-Lane Highways, Bauer, K.M. and Harwood, D.W. (2013)

Finalmente en CMF_{Tot} combinado para Curvas Horizontales y tangentes con tramos con curvas verticales se obtiene de la siguiente forma:

$$CMF_{Tot} = [(CMF_{FI} - 1,0) \times P_{FI} + (CMF_{PDO} - 1,0) \times P_{PDO}] + 1,0$$

Cabe destacar que tanto para el cálculo de los CMF para la metodología del HSM, como para la metodología propuesta por Harwood, se disponen de planillas de cálculo, publicadas en la página de la AASHTO y en página web donde se encuentra el trabajo citado respectivamente. A saber:

Planillas HSM

http://www.highwaysafetymanual.org/Pages/tools_sub.aspx

Planillas CMF combinación curvas horizontales y verticales

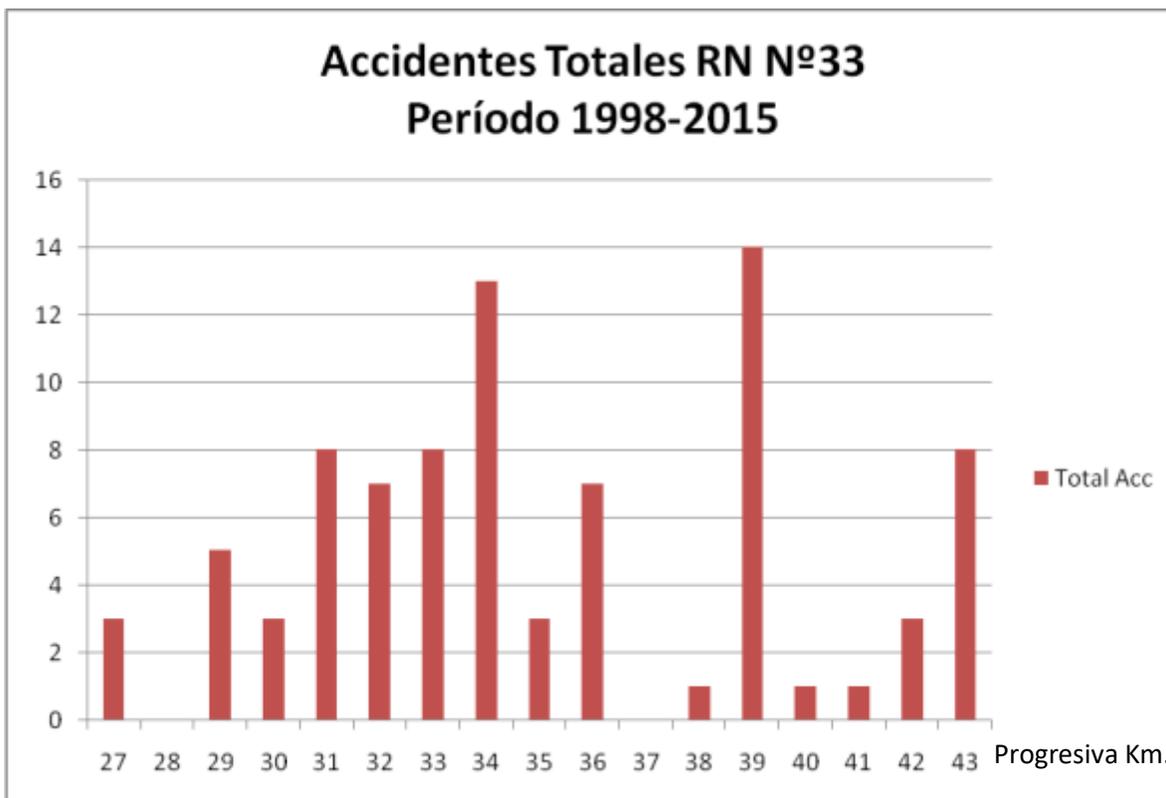
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/hrtm2130/index.cfm>

2 CASOS DE ESTUDIO

2.1 ACCIDENTOLOGÍA

Primeramente se analizaron los accidentes, adoptando la unidad de análisis el kilómetro, de tal forma que fuese fácil de identificar el lugar con su progresiva PK.

La base de datos disponible, de accidentes en la RN N° 33, comprende un período que va desde mayo de 1998 hasta agosto del 2015. Para el análisis se consideraron los valores medios anuales de un lapso de 17 años.



Fuente: Elaboración propia

2.2 GEOMETRÍA DEL TRAMO DE ESTUDIO

Se ha priorizado la elección de un tramo de interés de la R.N.N° 33 como caso a exponer, para complementar un trabajo realizado por el grupo Grupo Interdisciplinario para el Estudio de las Colisiones Viales. G.I.E.CO.V. de la Universidad Nacional del Sur, con aplicación al caso urbano.

La Ruta Nacional N° 33 se emplaza en su mayor parte en jurisdicción de la provincia de Buenos Aires. Tiene su inicio en la Ciudad de Bahía Blanca y se extiende en sentido Sur-Norte hasta la Ciudad de Rosario, en Santa Fé. El mencionado camino vincula nodos de gran desarrollo industrial y agrícola-ganadero, aspecto que determina una marcada presencia de vehículos pesados.

Se trata de un camino de dos carriles, pavimentado con carpeta de rodamiento asfáltica, y caracterizado por un TMDA de 4.000 veh/d y 40% de composición de vehículos pesados. La velocidad directriz es de 110 km/h.

El ancho de calzada es de 6,80 m, ambas banquetas de 3,00 m. Sus pendientes longitudinales varían entre 4,94% y 0,11%.

Los radios de curvas circulares se encuentran entre los 500 m y 1.000 m, todas ellas con transición de curva espiral.

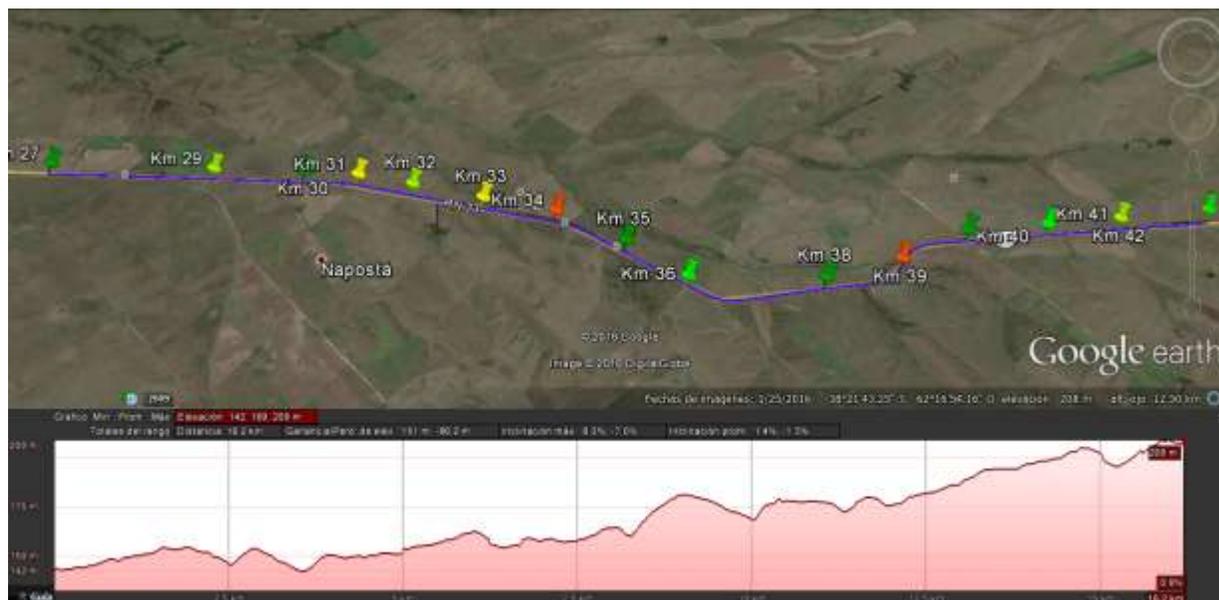
Entre los kilómetros 35 y 40 se ubica una zona de marcadas pendientes, acompañadas con curvas y contra curvas.



Inicio Zona de Toboganes R.N.N° 33, KM. 30 (cartel indicando camino sinuoso – ironía siniestra)



Zona de Toboganes R.N.N° 33, KM. 38



Planimetría de la R.N.º 33, con altimetría del Terreno Natural

Para el período comprendido entre mayo de 1998 y agosto de 2015, en la figura anterior se muestra la ubicación de los accidentes acontecidos agrupados en función de la progresiva kilométrica. Se utilizó para ello el siguiente código de colores:

- rojo: elevado número de accidentes
- amarillo: mediano número de accidentes
- verde: bajo número de accidentes

3 ANALISIS REALIZADO

Para el análisis de la geometría del tramo, se dispuso en formato papel de una planialtimetría, De la misma se procedió a medir y volcar todos los parámetros posibles en una planilla de cálculo, como la que se muestra a continuación:

RN 33																	
Km	CURVA VERTICAL					CURVA HORIZONTAL											
	COTA PIV	PROG PIV	i1	i2	Lcv	PC	CC	FC	delta	R	Le	Des	Te	Ee	p	s	
m	m	%	%	m	Km	m	m	m	°	m	m	m	m	m	%	m	
28,20	100,11	0															
28,40	100,50	195	0,20	0,67	280												
28,53	102,50	330	0,67	0,33	280												
29,11	104,40	910	0,33	-3,42	170												
29,37	95,50	1170	-3,42	0,00	90												
29,48	95,50	1278	0,00	3,48	120												
29,81	107,00	1605	3,48	-2,18	410												
30,55	90,75	2350	-2,18	3,71	250	30,99	2789,77		9° 44' 30"	1000	50	220,02	110,23	3,73	0	0	
30,82	100,60	2615	3,71	0,00	220	31,10		2900,00									
31,73	100,60	3525	0,00	0,78	300	31,21			3009,8								
32,25	104,50	4052	0,78	1,15	160												
33,03	113,75	4825	1,15	-3,10	170												
33,34	104,12	5135	-3,10	0,00	100												
33,81	104,12	5610	0,00	0,98	76												
33,95	105,50	5750	0,98	0,16	100	34,11	5910		18° 31' 10"	1000	50	365	188,05	13,31			
34,40	106,20	6195	0,16	4,94	150	34,29		6092,5									
35,00	117,85	6795	4,94	-4,30	252	34,48			6275								
35,20	108,60	7000	-4,30	4,82	200												
35,45	120,18	7250	4,82	3,16	0												
35,70	128,10	7500	3,16	0,87	0												
36,10	131,60	7900	0,87	0,21	65	36,20	8000		38° 41' 00"	600	60	445	240,7	36,16			
36,29	132,00	8090	0,21	-2,36	350	36,42		8222,5									
36,70	122,30	8500	-2,36	-4,64	60	36,65			8445								
36,87	114,40	8670	-4,64	0,00	55												
36,93	114,40	8730	0,00	6,65	55												
37,08	124,09	8875	6,65	3,36	0												
37,34	133,00	9140	3,36	-0,11	175												
37,61	132,90	9410	-0,11	-1,91	152												
37,85	128,20	9645	-1,91	1,03	105												
38,01	129,90	9810	1,03	-1,55	153												
38,32	121,40	10115	3,25	4,84	320												
38,64	137,00	10435	4,84	-4,25	350	38,47	10265		48 40"	500	80	430	266,35	49,34	6	0,6	
38,80	129,43	10600	-4,25	-2,24		38,68		10480									
38,95	126,00	10750	-2,24	1,60	350	38,90			10695								
39,15	129,11	10945	1,60	2,15		39,05	10845		51 52'	500	80	430	283,39	56,58	6	0,6	
39,34	133,10	11135	2,15	0,11	210	39,26		11060									
39,51	133,30	11305	0,11	1,32		39,48			11275								
40,38	144,85	12180	1,32	0,13	160												
40,70	145,28	12500	0,13														
41,88	156,75	13675	0,97	-4,78	260												
42,11	145,50	13910	-4,78	1,15	260												
42,23	146,50	14025	1,15	2,88													
42,35	150,11	14150	2,88	1,30	310												
42,56	152,50	14355	1,30	0,72	345												

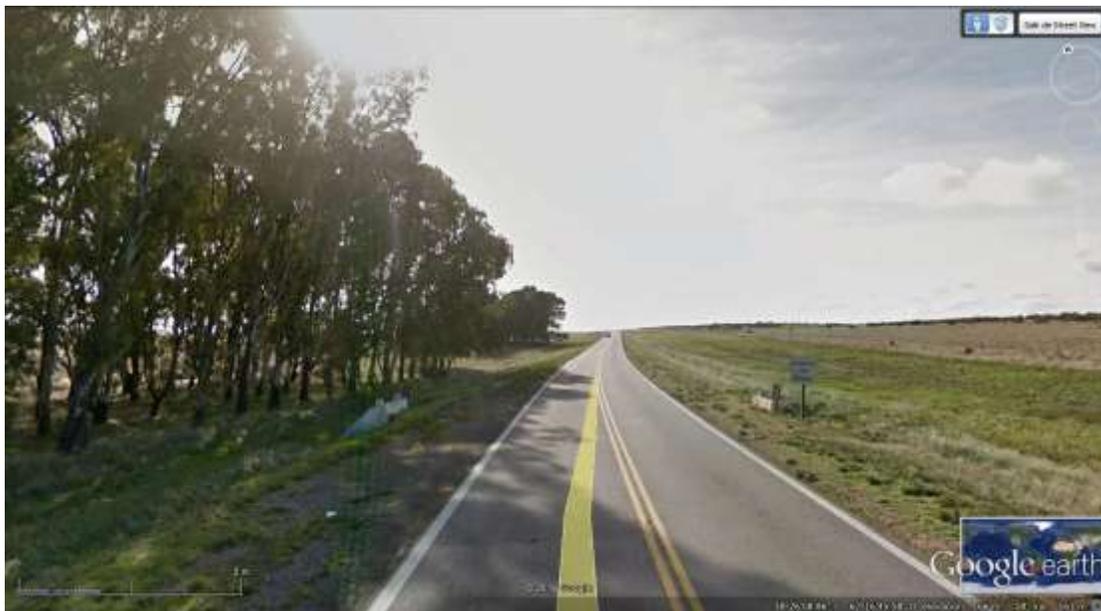
Fuente: Elaboración propia

Partiendo de la situación expuesta, se detectaron en el tramo de análisis RN N°33 tramo: Km 27 a Km 43, cinco curvas horizontales, en correspondencia con curvas verticales.

Asimismo se hallaron tramos rectos en planimetría con la presencia de curvas verticales.

Se procedió entonces a determinar los parámetros necesarios para aplicar la metodología del HSM.

Fue de gran ayuda el uso de las imágenes del google earth y del street view, para determinar el entorno de la zona de camino y datos del Inventario vial de la DNV, en su publicación del Código de Tramos de la Red Nacional de Caminos 2015.



R.N.N° 33, KM. 34 – Índice de Peligrosidad (IP) =4

Del estudio “Colisiones viales en Bahía Blanca: descripción y análisis del impacto urbanístico, sanitario y económico, 2012 – 2014”⁵, desarrollado por el Grupo Interdisciplinario del Estudio de las Colisiones Viales de Universidad Nacional del Sur, se obtuvo el diagnóstico respecto a la Ruta Nacional 33, destacándose tres focos de concentración de accidentes:

A la altura del IPES (-62,303 -38,579), Paraje La Vitícola (-62,292 -38,525) y una tercera zona entre los kilómetros 35 y 40, caracterizado por tratarse de un tramo de pendientes, curvas y contracurvas conocido como “Los Toboganes”. Justamente el caso de estudio incluye esta tercera zona.

Con las planillas de cálculo ya mencionadas se calcularon los coeficientes CMF y las funciones Función de Performance de Seguridad (N_{spf}) para cada uno de los sitios y finalmente el número de accidentes estimado por año ($N_{predicted}$).



Por otra parte se determino el número de accidentes observados del análisis de la base de datos, tomando el valor medio del período de 17 años.

Planilla con datos geométricos de los tramos

RN 33

Datos Geométricos por km

Tramo	Long (Km)	Long [mi.]	Carril (m)		ft	Banquina (m)		ft	Curvatura				Pend [%]	TWLT
			Izq.	Der.		Izq.	Der.		R [m]	ft	D [m]	mi		
27	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84						no
28	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84						no
29	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84					2	no
30	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84					3	no
31	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84	1000	3280,84	220	0,14	1	no
32	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84					1,1	no
33	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84					2	no
34	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84	1000	3280,84	365	0,23	3	no
35	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84					4	no
36	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84	600	1968,50	445	0,28	2	no
37	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84					2	no
38	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84	500	1640,42	430	0,27	4	no
39	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84	500	1640,42	430	0,27	2	no
40	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84					1	no
41	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84					3	no
42	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84					3	no
43	1	0,62	3,40	3,40	11,2	3,00	3,00	9,84					2	no

Siendo TWLT= camino de dos carriles con giro a la izquierda

Datos necesarios para aplicar metodología del HSM

Tramo	Espirales	Accesos		Franja sonora	Carril de de Adelantamiento	Indice Peligrosidad	Iluminación	Sist. de control automatico de
		[unidad/km]	[unidad/mi.]					Velocidad
27		<3	< 2	no	no	2	no	no
28		<3	< 2	no	no	2	no	no
29		<3	< 2	no	no	2	no	no
30		<3	< 2	no	no	2	no	no
31	si	<3	< 2	no	no	2	no	no
32		<3	< 2	no	no	4	no	no
33		<3	< 2	no	no	4	no	no
34	si	<3	< 2	no	no	4	no	no
35		<3	< 2	no	no	3	no	no
36	si	<3	< 2	no	no	3	no	no
37		<3	< 2	no	no	3	no	no
38	si	<3	< 2	no	no	4	no	no
39	si	<3	< 2	no	no	4	no	no
40		<3	< 2	no	no	3	no	no
41		<3	< 2	no	no	3	no	no
42		<3	< 2	no	no	2	no	no
43		<3	< 2	no	no	2	no	no



Calculo de Factores CMFfir

Tramo PK	CMF 1r	CMF 2r	CMF 3r	CMF 4r	CMR 5r	CMF 6r	CMF 7r	CMF 8r	CMF 9r	CMF 10r	CMF 11r	CMF 12r	CMF comb
27	1,03	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	0,94
28	1,03	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	0,94
29	1,03	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	0,94
30	1,03	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	0,94
31	1,03	0,98	1,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	1,05
32	1,03	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,07	1,00	1,00	1,08
33	1,03	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,07	1,00	1,00	1,08
34	1,03	0,98	1,07	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,07	1,00	1,00	1,15
35	1,03	0,98	1,00	1,00	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,11
36	1,03	0,98	1,09	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,10
37	1,03	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01
38	1,03	0,98	1,12	1,00	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,07	1,00	1,00	1,32
39	1,03	0,98	1,12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,07	1,00	1,00	1,20
40	1,03	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01
41	1,03	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01
42	1,03	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	0,94
43	1,03	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	0,94

Cálculo de N_{spf} y $N_{predicted}$, comparación con $N_{observado}$

Tramo	Long (Km)	Long [mi.]	N_{spf}	$N_{predicted}$ rs	Fatal and Injury (FI)		Property Damage Only (PDO)		HSM	$N_{predicted}$ rs	N observada (media valor /año)			Cr
					N Fi	N PDO	Total accidentes	Muertos			Heridos			
27	1	0,62	0,66	0,627	0,201	0,426	0,627				0,18	0,00	0,06	0,28
28	1	0,62	0,66	0,627	0,201	0,426	0,627				0,00	0,00	0,00	0,00
29	1	0,62	0,66	0,627	0,201	0,426	0,627				0,29	0,00	0,41	0,47
30	1	0,62	0,66	0,627	0,201	0,426	0,627				0,18	0,00	0,12	0,28
31	1	0,62	0,66	0,698	0,224	0,474	0,698				0,47	0,00	0,24	0,67
32	1	0,62	0,66	0,717	0,230	0,487	0,717				0,41	0,06	0,06	0,57
33	1	0,62	0,66	0,717	0,230	0,487	0,717				0,47	0,06	0,41	0,66
34	1	0,62	0,66	0,766	0,246	0,520	0,766				0,76	0,00	0,35	1,00
35	1	0,62	0,66	0,738	0,237	0,501	0,738				0,18	0,00	0,12	0,24
36	1	0,62	0,66	0,733	0,235	0,498	0,733				0,41	0,00	0,00	0,56
37	1	0,62	0,66	0,671	0,215	0,455	0,671				0,00	0,00	0,00	0,00
38	1	0,62	0,66	0,881	0,283	0,598	0,881				0,06	0,00	0,00	0,07
39	1	0,62	0,66	0,801	0,257	0,544	0,801				0,82	0,12	0,65	1,03
40	1	0,62	0,66	0,671	0,215	0,455	0,671				0,06	0,00	0,06	0,09
41	1	0,62	0,66	0,671	0,215	0,455	0,671				0,06	0,18	0,47	0,09
42	1	0,62	0,66	0,627	0,201	0,426	0,627				0,18	0,00	0,00	0,28
43	1	0,62	0,66	0,627	0,201	0,426	0,627				0,47	0,00	0,12	0,75

$Cr = N_{obs} / N_{pred}$ si $Cr < 1 \Rightarrow N_{obs} < N_{pred}$, el modelo sobreestima la cantidad de accidentes

$Cr = N_{obs} / N_{pred}$ si $Cr > 1 \Rightarrow N_{obs} > N_{pred}$, el modelo subestima la cantidad de accidentes



Se realizó un análisis particular de cada tramo de ruta, considerando casos con tramos rectos y curvas verticales por un lado, y por otro dónde se produce la superposición de una curva horizontal (CH) con una curva vertical (CV).

Para ello se determinó

Km 29: tramo recto con CV convexa Tipo 1

Km 31: tramo con CH y CV convexa Tipo 2

Km 33: tramo recto con CV convexa Tipo 1

Km 34 : tramo con CH y CV concava Tipo 2

Km 36: tramo con CH y CV convexa Tipo 1

Km 38: tramo con CH y CV convexa Tipo 1

Km 39 : tramo con CH y CV convexa Tipo 2

Km 42: tramo recto con CV cóncava Tipo 1

Km 43 : tramo recto con CV convexa Tipo 2

Se resumen en los cuadros siguientes los parametros de análisis y los Factores de Modificación de Accidentes combinados (CMF_{Tot}) resultantes.

Progresiva Km	Geometría		Pendiente Inicial	Pendiente Final	A (Por ciento)	L_{vc} (ft)	K (L_{vc}/A)	P_{FI}	P_{PDO}	CMF_{FI}	CMF_{PDO}	CMF_{TOT}
	Horizontal	Vertical										
29	Tangente	Tipo 1 Convexa	0,3	-3,4	3,8	558	149	0,321	0,679	1,00	1,00	1,00
33	Tangente	Tipo 1 Convexa	1,2	-3,1	4,3	558	131	0,321	0,679	1,00	1,00	1,00
42	Tangente	Tipo 1 Cóncava	-4,8	1,2	5,9	853	144	0,321	0,679	1,08	1,06	1,07
43	Tangente	Tipo 2 Convexa	1,3	0,7	0,6	1.132	1.952	0,321	0,679	1,00	1,00	1,00

Progresiva Km	Geometría		Pendiente Inicial	Pendiente Final	A (Por ciento)	R	L_c (ft)	L_{vc} (ft)	K (L_{vc}/A)	P_{FI}	P_{PDO}	CMF_{FI}	CMF_{PDO}	CMF_{TOT}
	Horizontal	Vertical												
31	Curva horizontal	Tipo 2 Convexa	3,7	0,0	3,7	3.281	0,14	722	195	0,321	0,679	1,28	1,13	1,18
34	Curva horizontal	Tipo 2 Cóncava	0,2	4,9	4,8	3.281	0,23	492	103	0,321	0,679	1,27	1,20	1,22
36	Curva horizontal	Tipo 1 Convexa	0,2	-2,4	2,6	1.969	0,28	1.148	447	0,321	0,679	1,07	1,04	1,05
38	Curva horizontal	Tipo 1 Convexa	4,8	-4,3	9,1	1.640	0,27	1.148	126	0,321	0,679	1,32	1,16	1,21
39	Curva horizontal	Tipo 2 Convexa	2,2	0,1	2,0	1.640	0,27	689	338	0,321	0,679	1,48	1,21	1,30

Cabe destacar que el factor CMF_{Tot} , puede reemplazar en la metodología del HCM al producto de $CMFr3 \times CMFr5$, que tenía en cuenta la presencia de curvas horizontales y tramos con pendientes para el sitio de análisis considerado.

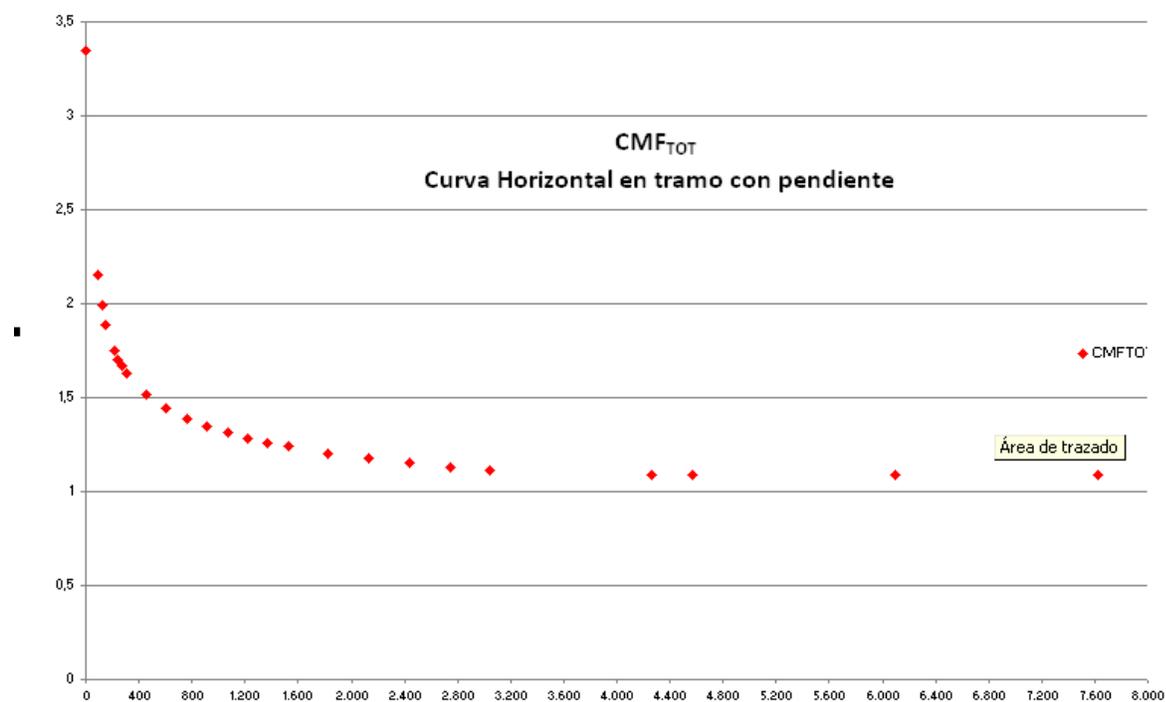
Tramo PK	HSM	CMF _{Tot}
	CMF 3r x CMR 5r	Combinación CH y CV
27		
28		
29	1,00	1,00
30		
31	1,11	1,18
32		
33	1,00	1,00
34	1,07	1,22
35		
36	1,09	1,05
37		
38	1,23	1,21
39	1,12	1,30
40		
41		
42	1,00	1,07
43	1,00	1,00

El análisis combinado de las curvas horizontales y verticales implica evaluar más parámetros para análisis, lo cual llevaría a un mayor ajuste respecto al modelo del HSM.

Para lograr una rigurosa representatividad de una ruta rural en Argentina, se requeriría más cantidad de rutas bajo análisis y el incremento de la cantidad de tramos de cada una de ellas.

Corresponde hacer notar para entender el concepto de CMF_{TOT} para la combinación de curvas horizontales con tramos con pendientes.

Si por ejemplo tenemos una pendiente longitudinal de 2% y realizamos un análisis de sensibilidad variando el radio de la curva horizontal utilizando la planilla de cálculo, se obtiene el siguiente gráfico:



Fuente: Elaboración propia

Aquí claramente se observa que para curvas horizontales con radios menores a 500 m, el CMF_{TOT} aumenta fuertemente a medida que el radio disminuye.

4 RESULTADOS Y CONCLUSIONES – RECOMENDACIONES

El análisis combinado de las curvas horizontales y verticales, permitió el cálculo de los factores de modificación de accidentes totales, permitiendo calcular el número de accidentes $N_{\text{predicted}}$. Por otra parte la metodología del HSM permitió obtener el valor de $N_{\text{predicted rs}}$.

Del análisis comparativo con los $N_{\text{observados}}$, no fue posible hallar una correlación inmediata; sí se observa que a menor radio de curva horizontal, mayor es la cantidad de accidentes por año.

Para un mayor ajuste se necesitaría una muestra representativa mayor, tanto de tramos como de rutas a considerar.

Tramo PK	HSM	Con CMF CH y CH	Reales
	$N_{\text{predicted rs}}$	$N_{\text{predicted}}$	$N_{\text{observados}}$
27	0,63		0,18
28	0,63		0,00
29	0,63	0,63	0,29
30	0,63		0,18
31	0,70	0,74	0,47
32	0,72		0,41
33	0,72	0,72	0,47
34	0,77	0,88	0,76
35	0,74		0,18
36	0,73	0,70	0,41
37	0,67		0,00
38	0,88	0,87	0,06
39	0,80	0,93	0,82
40	0,67		0,06
41	0,67		0,06
42	0,63	0,67	0,18
43	0,63	0,63	0,47

Para el caso de estudio se halló que el tramo posee curvas horizontales con radios de 500 m y 600 m. Visto el proceso realizado en este trabajo se recomendaría como mejora ampliar los radios de esas curvas a valores mayores a 500 m con la coordinación planialtimétrica correspondiente.

Este trabajo es una primera aproximación hacia el análisis de las metodologías a aplicar en casos que contemplen la coordinación planialtimétrica. Propone extender la utilización del estudio a tramos de distintas rutas del país.



Se propone designar una comisión de trabajo integrada por ingenieros civiles especialistas dedicados a investigar estos temas (contemplando la visión multidisciplinaria de distintos profesionales) y a elaborar normativas de diseño con énfasis en la seguridad vial.

Bibliografía

1. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2010). Highway Safety Manual, 1st Edition with suplement 2014 AASHTO, Washington, DC.
2. Bauer, K.M. and Harwood, D.W. (2013). Safety Effects of Horizontal Curve and Grade Combinations on Rural Two-Lane Highways, Report No. FHWA-HRT-13-077, Federal Highway Administration, Washington, DC.
3. Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM) Predictive Method 2015 Release (version 11.0.1, October 1, 2015) Federal Highway Administration
4. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2011). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, AASHTO, Washington, DC.
5. Colisiones viales en Bahía Blanca: descripción y análisis del impacto urbanístico, sanitario y económico. 2012 – 2014. Grupo Interdisciplinario para el Estudio de las Colisiones Viales. G.I.E.CO.V. Universidad Nacional del Sur. Año 2015.
6. Evaluación de Indices de Peligrosidad. María Graciela Berardo - Rodolfo Guillermo Freire - Paula Marchesini - Mauro Iván Tartabini - Gustavo Daniel Vanoli - Agustín Casares - Universidad Nacional de Córdoba- XVI Congreso Argentino de Vialidad y Transito 2012 Córdoba – Argentina