

A hazard index for roadside of two-lane rural roads

Un índice de peligrosidad para zonas laterales de carreteras de dos carriles

Juan Ignacio Rivera ^a & Tomas Echaveguren ^b

^a MSc, Universidad de Concepción, Chile, jriverab@udec.cl

^b PhD, Profesor Asociado, Universidad de Concepción, Chile, tehaveg@udec.cl

Received: July 22th, 2013. Received in revised form: January 15th, 2014. Accepted: January 17th, 2014

Abstract

Roadside areas are elements intended to reduce the Run-off-road crashes. The hazardousness is an indicator of compliance of this objective. There are few methods to measure hazardousness, which usually depend of the availability of accident data. This paper examines the factors that explain the roadside hazardousness on the basis of existing models and analysis of field data. It was determined that the clearance side next to the barriers of protection, especially in curves with inclined slopes, it is significant to explain the hazards. It was determined that for straights and curves without barriers is relevant the type of object and its position measured position in the roadside.

Keywords: Roadside hazardous, highways.

Resumen

Las zonas laterales de carreteras son elementos destinados a reducir la severidad de accidentes por salida de calzada. La peligrosidad es un indicador de cumplimiento de este objetivo. Existen pocos métodos para medir peligrosidad, que usualmente dependen de la disponibilidad de datos de accidentes. Este trabajo estudia los factores que explican la peligrosidad con base en modelos existentes y el análisis de datos de campo. Se determinó que el despeje lateral junto a las barreras de protección, especialmente en curvas con taludes inclinados, es significativo para explicar la peligrosidad. Se determinó que en rectas y curvas sin barreras de protección es relevante el tipo de objeto y su posición en la zona lateral.

Palabras Clave: Zonas laterales, peligrosidad, carreteras

1. Introducción

Las zonas laterales (ZL) de las carreteras corresponden al espacio comprendido entre la berma y el límite de la faja vial. En promedio, entre 30 % y 45 % de los accidentes con resultado de muerte en carreteras en el mundo ocurren en las zonas laterales, debido a que los vehículos que pierden el control se desplazan hacia los costados de las vías colisionando con algún objeto o volcando hacia depresiones [1- 2]. Este tipo de accidentes se conoce como accidentes por salida de calzada.

El grado de daño potencial de los ocupantes del vehículo está directamente relacionado con la presencia o ausencia de objetos y/o depresiones, con su densidad a lo largo de la vía y su distancia respecto del borde de las bermas. Este grado de daño se define como peligrosidad, la cual es una medida indirecta del riesgo de accidentes, que depende del tipo de objeto o depresión presente en la zona lateral tales como: árboles, muros, postes eléctricos, rocas, zanjas, pendientes laterales pronunciadas, accesos vehiculares, señales de tránsito, postes de pórticos, sistemas de contención sin

ancho de trabajo adecuado, terminales de puentes y estructuras [3-4].

Por lo anterior, las normativas de diseño geométrico han establecido especificaciones de diseño para las secciones transversales de las carreteras, que proporcionan áreas libres de depresiones y obstáculos, para emplearlas como elementos de seguridad pasiva.

Las ZL como elemento de diseño geométrico nacieron en la década de los 60 en Estados Unidos. El “Consejo Nacional de Seguridad” estimaba que más del 45 % de las muertes en accidentes de tránsito ocurría en dichas áreas y que por lo tanto se debían adoptar medidas para reducir la mortalidad. Para ello implementaron campos de prueba como parte un sistema de caminos privados desarrollado por la compañía automotriz *General Motors*, con el fin de evaluar la seguridad de sus vehículos y anticipar posibles accidentes, además de establecer salvaguardias para minimizar los efectos de fallas tanto humanas como mecánicas [5].

AASHTO publicó la primera guía formal de diseño de ZL en 1988. La “Guía de Diseño de Zonas Laterales”

(*Roadside design guide*) estableció recomendaciones de diseño y un método de cálculo de peligrosidad en ZL [6].

Desde ese entonces, el concepto de ZL ha evolucionado. Actualmente se concibe como un elemento de seguridad pasiva que tiene por objetivo re-direccionar al vehículo fuera de control y/o a mitigar la severidad de los posibles accidentes que allí pudiesen ocurrir.

La Figura 1 muestra que las ZL se compone de 3 elementos [7]: La zona 1 (Z1) que corresponde al espacio adyacente a la calzada entre la berma y el sobre ancho de la plataforma; la zona 2 (Z2) que corresponde a la zona libre de obstáculos y contigua a la zona 1 y la zona 3 (Z3), que corresponde al espacio entre el despeje lateral y el resto de faja vial.

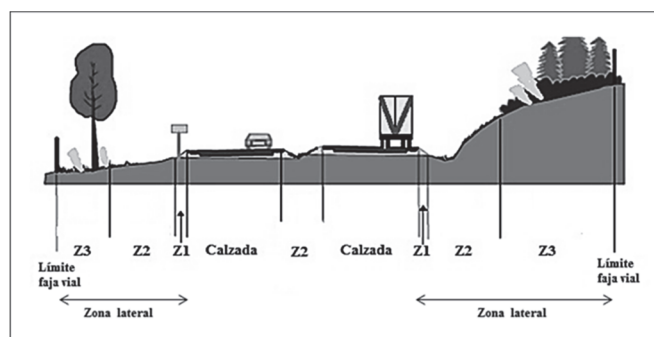


Figura 1. Componentes de la zona lateral

Un aspecto importante para el diseño de ZL es contar con especificaciones de diseño que minimicen la peligrosidad, tanto en la fase de diseño como en la fase de operación de las carreteras. Por lo tanto, el problema esencial es contar con un índice que permita calificar la peligrosidad y tomar decisiones con base en esa calificación [8]: eliminar obstáculos, modificar la zona lateral, disponer atenuadores de impacto o barreras y delinear los obstáculos,

Tabla 1. Criterios para calcular el índice RHR [12]

RHR	Despeje lateral (m)	Talud	Recuperación del control	Característica de la zona lateral
1	≥ 9.0	menor a 1:4	Si	Llana y no rugosa
2	6.0 – 7.5	1:4	Si	Llana y no rugosa
3	3.0	1:3 a 1:4	Si	Superficie rugosa
4	1.5 – 3.0	1:3 a 1:4	Si	Barreras; árboles, postes, otros
5	1.5 – 3.0	1:3	No	Barreras
6	< 1.5	1:2	No	Sin barrera – obstáculos rígidos
7	< 1.5	mayor a 1:2	No	Sin barrera – risco o corte vertical

La peligrosidad varía a lo largo de la carretera, por lo cual el método de calificación usa un valor promedio que representa la peligrosidad general de un tramo del camino. Lo anterior se aplica a casos donde las condiciones de borde son cambiantes y con diversidad de zonas despejadas, obstáculos y taludes.

Ayati *et al* [13] usaron los valores de RHR para estimar el peso relativo de los elementos potencialmente peligrosos sobre la peligrosidad de las ZL usando el enfoque de procesos analíticos jerárquicos de Saaty.

Karpinski [14] adaptó el índice RHR incluyendo un índice de severidad como función de las consecuencias de los accidentes por salidas de la calzada sobre las personas.

retirar obstáculos, cubrir depresiones y disponer de sistemas de contención lateral.

Los estudios realizados para evaluar los factores asociados a este tipo de accidente son escasos, debido a la dificultad que reviste desarrollar procedimientos que permitan caracterizar cuantitativamente la peligrosidad, lo cual requiere de datos de accidentes que no siempre están disponibles. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue proponer un índice de peligrosidad para zonas laterales de carreteras basado datos de terreno mediante regresión lineal generalizada (GLM), que permita identificar los factores e interacciones que mejor describen dicha peligrosidad.

2. Los índices de peligrosidad

Los índices de peligrosidad intentan explicar el grado de peligro y la exposición al riesgo de accidentes. La literatura muestra pocos estudios sobre estimación de estos índices, siendo el más importante el trabajo de Zeeger en 1988 [9].

Existen otros índices de peligrosidad de zonas laterales que son parte de indicadores de seguridad vial. Por ejemplo el índice RSI (*Road Safety Index*) es parte del indicador IS (*Safety Index*) desarrollado en el proyecto IASP (*Identificazione e Adeguamento delle Strade Pericolose*) de la Comunidad Europea [10].

2.1 El índice RHR

El índice RHR (*Roadside Hazard Rating*) es una escala de calificación de peligros en las ZL que varía de 1 a 7, siendo 1 el más bajo y 7 el más alto [11]. La calificación depende de la condición del despeje lateral, de la inclinación del talud, de la presencia de obstáculos y de la superficie disponible para la recuperación de control, como lo muestra la Tabla 1.

Estableció un índice que varía de 1 a 4 en función de la severidad de los accidentes observados y la distancia entre la berma y los obstáculos presentes en las ZL.

2.2 El índice RHI

El índice RHI (*Roadside Hazardous Index*) expresa la influencia de la configuración física de las ZL sobre la frecuencia y severidad de los accidentes por salida de calzada. Considera como variables el tipo de trazado geométrico, la inclinación del talud, el despeje lateral y la presencia de barreras de contención.

El índice RHI establece 7 niveles de peligrosidad. El nivel 1 está asociado a la condición de la ZL que permite recuperar el control del vehículo sin provocar ninguna lesión. El nivel 7 representa condiciones extremas con alta probabilidad de impactar con objetos, sufrir vuelcos y lesiones severas.

Pardillo *et al* [15] establecieron estos niveles a partir de un análisis de conglomerados en que intervinieron además de las componentes físicas de la zona lateral, índices de accidentes por salida de la calzada y de severidad de accidentes por salida de calzada. Como resultado del mencionado análisis, obtuvieron la escala de calificación de peligrosidad de la Tabla 2.

Tabla 2.
Características de las ZL del índice RHI [15]

RHI	Características de las zonas laterales
1	Tramos en llano con obstáculos a más de 5 m
2	Tramos en llano con obstáculos entre 3 y 5 m o Pendientes de talud entre 1:3 y 1:4 y obstáculos a más de 5 m
3	Rectas con pendiente de talud entre 1:3 y 1:4 y obstáculos entre 3 y 5 m o Pendientes de talud mayores a 1:3 y obstáculos a más de 5 m
4	Rectas con barrera
5	Curvas con barrera
6	Rectas con pendientes de talud entre 1:3 y 1:4 y obstáculos a menos de 3 m; curvas con pendientes de talud entre 1:3 y 1:4 y obstáculos entre 3 y 5 m; y curvas con pendientes de talud mayor que 1:3 y distancias a obstáculos mayor que 5 m
7	Tramos con pendientes de talud mayor a 1:3 y obstáculos a menos de 5 m o curvas con distancias a obstáculos menor a 3 m

Li *et al* [16] desarrollaron un método similar al índice RHI aplicando el análisis de conglomerados grises a 4 factores: trazado, tráfico, historia de accidentes por salida de calzada y características físicas de las ZL.

2.3 El índice RSI

El índice RSI (*Roadside Safety Index*) forma parte del índice de seguridad de caminos bidireccionales (IS) del proyecto IASP [17]. Se estima mediante la Ec. 1, en la cual WS es la puntuación ponderada de los problemas de seguridad en las zonas laterales; P es el porcentaje de accidentes relacionados con la zona lateral. Se puede adoptar P=0.3 [5]. ΔAS es el aumento relativo en la severidad del accidente y asume el valor 2.

$$RSI = 1 + (WS)(P)(\Delta AS) \quad (1)$$

La puntuación ponderada (WS) de los peligros de las ZL se obtiene mediante la Ec. 2 para el tramo de muestreo k. El término n es el total de tramos de muestreo.

$$WS = \sum_{k=1}^{2n} \frac{\max(wP_j)_k}{(2n)5} \quad (2)$$

La calificación P_j se obtiene de una evaluación en terreno de los elementos constituyentes de las ZL, tales como: talud de terraplén, puentes, terminales, transiciones

peligrosas, árboles, postes, obstáculos rígidos y zanjas, calificándolos entre 0, 0.5 y 1, según si el peligro es de relevancia nula, media o alta para la seguridad vial. El factor de ponderación w varía entre 1 y 5 dependiendo del tipo de obstáculo.

3. Análisis de los índices de peligrosidad existentes

Previo a la elaboración del índice de peligrosidad (IP) con datos de terreno, se realizó un análisis de los modelos RHR, RHI y RSI existentes mediante el estudio de escenarios de la Figura 2. A partir de ellos se identificó el efecto de las diversas variables sobre la peligrosidad en las ZL y definir a priori las variables a medir posteriormente en terreno. Las variables de modelación consideradas en el análisis fueron: la jerarquía de la vía, el volumen de tránsito expresado en vehículos/día-año, el despeje lateral, el talud transversal de la ZL, y la presencia de barreras de contención.

Para cada una de estas variables se establecieron rangos de interacción de acuerdo con las condiciones geométricas y de operación de las carreteras de Chile. Esta clasificación representa para cada variable y cada categoría dentro de la variable, los valores mínimo, máximo y más probable.

Las celdas de la matriz de la Figura 2 representan valores individuales de cada uno de los índices de peligrosidad RHR, RHI y RSI. Estos índices se calcularon mediante los modelos descritos en el capítulo 2, para diferentes valores de los datos de entrada muestreados dentro de los rangos de establecidos por cada modelo para cada una de las variables explicativas.

Considerando dos repeticiones por celda, se obtuvieron 432 valores de cada uno de los índices. Luego de normalizar los índices a una escala única, se realizó un análisis de regresión con los todos ellos por separado para cada una de las 3 categorías de carretera establecidas en los escenarios de análisis de la Figura 2: autopista y auto-ruta (C1), primario y colector (C2) y local y desarrollo (C3). Considerando las 24 combinaciones de condición de las zonas laterales, 3 niveles de TMDA por categoría y los 3 índices de peligrosidad, se obtuvieron 216 casos para cada categoría.

Los resultados obtenidos se aprecian en las Ec. 3, 4 y 5. El coeficiente de determinación ajustado (R²a) obtenido en los tres modelos fue superior a 0.7 y el error resultante (S) fue de 0.9.

$$IP(C1) = 3.024 + 4.132 \times 10^{-5} TMDA - 0.345 DESPEJE + 5.548 TALUD - 0.278 BARRERA \quad (3)$$

R²a=0.77; S=0.9; N=216

$$IP(C2) = 3.634 + 9.349 \times 10^{-5} TMDA - 0.4195 DESPEJE + 3.173 TALUD - 0.1538 BARRERA \quad (4)$$

R²a=0.71; S=0.9; N=216

$$IP(C3) = 3.820 + 8.455 \times 10^{-5} TMDA - 0.4200 DESPEJE + 2.500 TALUD - 0.097 BARRERA \quad (5)$$

R²a=0.70; S=0.9; N=216

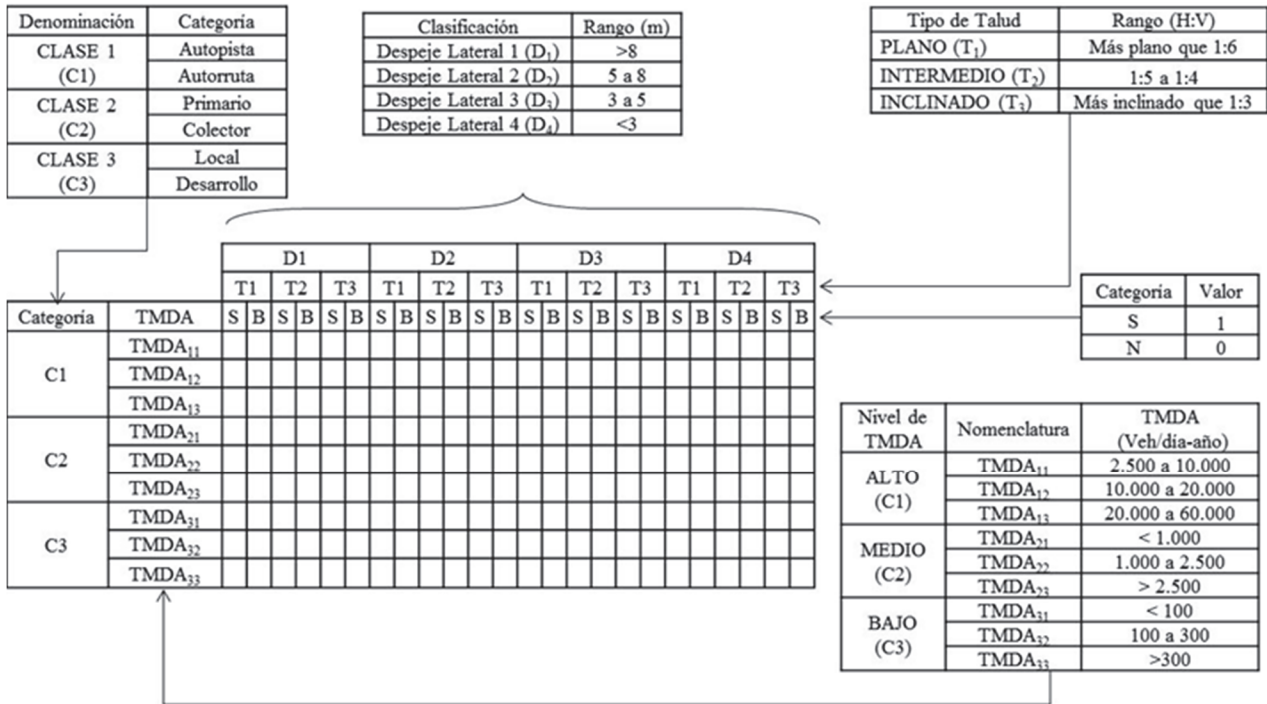


Figura 2. Variables y escenarios de cálculo considerados en el análisis de IP

En las Ec. 3, 4 y 5, TMDA es el tránsito medio diario anual, expresado en veh/día-año; DESPEJE es la distancia entre el borde de la berma y el primer obstáculo presente en la ZL, en m; TALUD es la inclinación del talud de corte/terraplén, medida en decimal y BARRERA describe la presencia (BARRERA = 1) o ausencia (BARRERA = 0) de barreras de contención en el tramo de medición.

Las Ec. 3, 4, y 5 se obtuvieron a partir de los escenarios posibles descritos en la Figura 2, considerando rangos de las variables de acuerdo a los estándares de diseño geométrico de Chile. Estos resultados estiman valores de peligrosidad que agrupan los 3 índices descritos en el capítulo 2, pero separados por categoría de diseño. Las variables explicativas consideradas son comunes a los 3 métodos analizados.

Del análisis de simulación de los índices de peligrosidad, se identificaron dos variables potencialmente relevantes como son la existencia de curvas horizontales y la clasificación por tipo de objeto, que no están explícitamente incluidas en las ecuaciones 3, 4, y 5 dado que no son comunes a todos los índices.

4. Toma de datos en terreno

La recopilación de datos en el terreno se ejecutó sobre tramos de medición de 100 m que consideraban elementos curvos y rectos aledaños previamente utilizados para estudios de velocidad límite [18]. Dichos estudios consideraron tramos ubicados en terreno plano.

De este modo, se obtuvieron 236 tramos de medición. Posteriormente, se seleccionaron en terreno los tramos definitivos de medición aplicando los criterios siguientes: (a) emplazamiento sólo en vías rurales, (b) sólo tramos sin obras o trabajos en la vía y (c) presencia de bermas o espacio en los extremos del tramo de medición suficiente

para disponer de equipos y vehículo en zonas seguras. Aplicando estos criterios se eliminaron en terreno 22 tramos, con lo cual las mediciones se realizaron finalmente en 214 tramos.

Las variables medidas en terreno fueron el despeje lateral, el talud transversal, el tipo de obstáculo, la presencia de barreras de contención y la geometría de la vía. Asimismo, se estimaron los datos de tránsito medio diario anual (TMDA, en veh/día-año) para las rutas estudiadas, en base a los datos del Plan Nacional de Censos de la Dirección de Vialidad de Chile [19]. Esta base de información contiene datos de tránsito desde el año 1994 hasta el año 2012.

El despeje lateral se obtuvo a través de la medición directa de la distancia horizontal existente entre la berma y el objeto u obstáculo dentro de la ZL más cercano. La medición se realiza con huincha métrica, registrando horizontalmente la distancia antes señalada.

El talud transversal se obtuvo a través de medición indirecta de la inclinación promedio con el apoyo de un taquímetro, midiendo 3 puntos a lo largo de la ZL en la unidad de muestreo. Se estimó la inclinación promedio de cada talud en decimal.

El tipo de obstáculo se obtuvo a través de la identificación visual del objeto más próximo a la calzada y que constituye el primer elemento de riesgo de accidente ante la pérdida de control vehicular. La presencia de barrera contención y su geometría se obtuvieron por identificación visual. Se registró presencia o ausencia de barreras de contención y la presencia de una recta (R) o de una curva (C). La Tabla 3 resume los datos obtenidos en terreno.

Tabla 3.

Resumen de datos obtenidos en las mediciones en terreno

Ruta	# Tramos	# Curvas	# Rectas	DESPEJE (m)	TALUD (decimal)	TMDA (veh/día-año)	Barreras	Obstáculos (#)
1	11	7	4	0.5 – 3.5	0.25 – 1.00	5765	Si	Árbol (1), Corte (6), Zanja (3), O. de Arte (1)
2	27	13	14	1.0 – 3.5	0.17 – 1.00	56 – 3198	No	Poste (14), Zanja (6), Rocas (3), Árbol(3), Canal (1)
3	21	7	14	1.0 – 3.0	0.25 – 0.33	3043	No	Poste (8), Zanja (3), Rocas (2), Árbol(4), Vegetación (6)
4	81	26	55	0.5 – 8.0	0.25 – 1.00	2004 – 2770	Si	Poste (15), Zanja (13), Rocas (29), Árbol(13), Vegetación (9)
5	74	23	51	1.0 – 8.0	0.17 – 1.00	75 – 7015	Si	Poste (15), Zanja (36), Rocas (10), Árbol(11), Vegetación (2)

5. El índice de peligrosidad propuesto

Para obtener el IP, se utilizaron los datos obtenidos en terreno y los resultados obtenidos en la sección 3 de este trabajo. Considerando que todos los índices analizados convergen a las Ec. 3, 4 y 5, se analizaron los efectos de los factores DESPEJE, BARRERAS, TALUD, TMDA y GEOMETRIA sobre la peligrosidad evaluada en terreno usando el índice RHI. Se seleccionó este modelo debido a que incorpora de manera simple las características físicas de las ZL, y la geometría de la carretera representada a través solo de rectas y curvas. Esto facilita el trabajo de levantamiento de información en terreno. Asimismo, el modelo considera indirectamente las características generales del terreno donde se emplaza la carretera a través de la categoría de diseño. En el futuro se puede incluir esta variable agregándolo como factor en la Figura 2.

Para el análisis se utilizó la regresión lineal generalizada, ya que permite obtener modelos aditivos con variables categóricas y binarias, aplicar funciones de transformación para

normalizar residuos mal comportados, e incluir la interacción entre variables. En primer lugar se analizaron 3 modelos sin interacción entre variables a partir de la Ec. 6. Luego se probaron modelos con interacción entre variables.

5.2 Modelo sin interacción entre variables

La Tabla 4 muestra los resultados de la regresión para el modelo lineal de la Ec. 6 usando los datos de terreno obtenidos de acuerdo a lo descrito en sección 4. En ella se muestran los valores de los coeficientes de regresión (β_i), el valor t de student asociado a cada coeficiente de regresión y el valor p, que representa la significancia estadística de cada coeficiente de regresión, para 3 modelos distintos basados en la formulación de la Ec. 6

$$IP = \beta_0 + \beta_1 TMDA + \beta_2 DESPEJE + \beta_3 TALUD + \beta_4 BARRERA + \beta_5 GEOMETRIA \quad (6)$$

Tabla 4.

Resultados del análisis de regresión de modelo lineal sin interacciones

Modelo 1: Ecuación 6 considerando todas las variables excepto GEOMETRIA				
Coefficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_0	+7.27	+32.10	0.000	Significativo
β_1	-0.00006	-1.41	0.157	No significativo
β_2	-0.94	-15.00	0.000	Significativo
β_3	+0.89	+3.00	0.003	Significativo
β_4	+0.83	+2.30	0.024	Significativo
β_5	0.00	0.00	0.000	
S = 1.2	$Ra^2 = 0.54$	N=213		
Modelo 2: Ecuación 6 considerando todas las variables excepto TMDA y GEOMETRIA				
Coefficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_0	+7.13	+34.6	0.000	Significativo
β_1	0.00	0.0	0.000	
β_2	-0.96	-15.5	0.000	Significativo
β_3	+0.78	+2.1	0.034	Significativo
β_4	+0.86	+2.85	0.005	Significativo
β_5	0.00	0.00	0.000	
S = 1.1	$Ra^2 = 0.53$	N=213		
Modelo 3: Ecuación 6 considerando todas las variables excepto TMDA				
Coefficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_0	+7.10	+42.9	0.000	Significativo
β_1	0.00	0.0	0.000	
β_2	-1.05	-20.0	0.000	Significativo
β_3	+0.29	+1.1	0.290	No significativo
β_4	-0.18	-0.8	0.417	No significativo
β_5	+1.46	+11.6	0.000	Significativo
S = 0.8	$Ra^2 = 0.76$	N=213		

El modelo 1 de la Tabla 4 muestra que la variable TMDA no resulta significativa puesto que el valor p es mayor que el nivel de significancia del 95 %. Por tanto se puede eliminar del análisis. En el caso del modelo 2 de la Tabla 4, se aprecia que las variables DESPEJE, TALUD y BARRERA son

significativas. Se aprecia también que al incorporar la variable GEOMETRIA (modelo 3 de la Tabla 4), la calidad del modelo mejora sustancialmente respecto del modelo 2, pero pierden significancia las variables BARRERA y TALUD. Esto implica que individualmente estas variables no contribuyen a explicar la

peligrosidad de las zonas laterales por lo cual es necesario estudiar las interacciones.

Dentro de las variables significativas, el despeje lateral (variable DESPEJE), contribuye a reducir la peligrosidad, lo cual es consistente con la evidencia del estado del arte. Lo mismo ocurre con la variable GEOMETRIA. La presencia de curvas horizontales, contribuye a aumentar la peligrosidad de la ZL. Considerando lo anterior, se incluyó en el análisis la interacción entre variables. Para especificar estas interacciones se asumió que:

- La inclinación del talud protegido con barrera en rectas incrementa la peligrosidad,
- barreras en ausencia de curvas en terreno llano incrementan la peligrosidad,

- taludes inclinados sin protección en rectas incrementan la peligrosidad,
- la presencia de barreras protegiendo taludes en curvas reduce la peligrosidad,
- la presencia de taludes en curvas sin considerar el efecto de las barreras incrementa la peligrosidad.

Con estos supuestos se analizó el modelo de la Ec. 7. Los resultados de la regresión se resumen en la Tabla 5. Estos no consideran el tipo de obstáculo presente en la ZL.

$$IP = \beta_0 + \beta_1 \text{DESPEJE} + \beta_2(\text{BARRERAS})(\text{TALUD}) + \beta_3(\text{GEOMETRIA})(\text{TALUD}) + \beta_4(\text{GEOMETRIA})(\text{TALUD})(\text{BARRERAS}) \quad (7)$$

Tabla 5. Resultados del análisis de regresión de modelos lineales con interacciones

Coefficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_0	+7.16	+57.0	0.000	Significativo
β_1	-0.93	-19.9	0.000	Significativo
β_2	+3.76	+7.2	0.000	Significativo
β_3	+2.26	+9.8	0.000	Significativo
β_4	-4.33	-6.6	0.000	Significativo
S = 0.8	Ra ² = 0.74	N=213		

Los resultados de la Tabla 5 muestran que: al aumentar el despeje lateral (DESPEJE) la peligrosidad se reduce ($\beta_1 < 0$); en curvas horizontales con taludes inclinados y barreras de protección la peligrosidad se reduce ($\beta_4 < 0$); en curvas con taludes inclinados sin protección se incrementa la peligrosidad ($\beta_3 > 0$); y en terreno recto, llano y con taludes inclinados, la peligrosidad se incrementa independientemente de la presencia de barreras ($\beta_2 > 0$).

El modelo descrito por la Ec. 7 es más robusto que los modelos descritos por las Ec. 4, 5 y 6, por lo cual es recomendable para predecir la peligrosidad de zonas laterales. Sin embargo, si bien el modelo descrito por la Ec. 7 resulta adecuado estadísticamente, no incorpora como variable el tipo de obstáculo, aspecto que es importante desde el punto de vista de la gestión del mantenimiento y de la seguridad vial.

5.2. Modelo con interacción entre variables

Para analizar este efecto se especificaron 2 modelos adicionales, separando el efecto de rectas y curvas y aislando de la muestra aquellos tramos de medición en donde no se contaba con elementos de protección. Los objetos se codificaron según: OBJETO = 1.0 para árboles, postes, zanjas, obras de arte, rocas, cortes; OBJETO = 0.5 para vegetación y OBJETO = 0.0 para zona despejada sin obstáculos. El modelo especificado para zonas rectas sin barreras de proyección y presencia de taludes se representó usando las Ec. 8. Para curvas se especificó el modelo de la Ec. 9. La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos mediante regresión generalizada.

$$IP = \beta_{0R} + \beta_{1R} \text{DESPEJE} + \beta_{2R} \text{OBJETO} + \beta_{3R} \text{TALUD} + \beta_{4R} (\text{DESPEJE})(\text{OBJETO})(\text{TALUD}) \quad (8)$$

$$IP = \beta_{0C} + \beta_{1C} \text{DESPEJE} + \beta_{2C} (\text{DESPEJE})(\text{GEOMETRIA})(\text{OBJETO}) \quad (9)$$

Tabla 6. Resultados del análisis del efecto del tipo de objeto en rectas y curvas sin barreras

Modelo para rectas				
Coefficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_{0R}	+ 5.52	+5.1	0.000	Significativo
β_{1R}	-0.73	-4.3	0.000	Significativo
β_{2R}	+1.01	+1.4	0.170	No significativo
β_{3R}	+3.35	+3.0	0.003	Significativo
β_{4R}	-1.62	-3.7	0.000	Significativo
S = 0.76	Ra ² = 0.80	N=121		
Modelo para curvas				
Coefficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_{0C}	+7.55	+74.7	0.000	Significativo
β_{1C}	-1.25	-29.8	0.000	Significativo
β_{2C}	+0.82	-18.4	0.000	Significativo
S = 0.64	Ra ² = 0.86	N=178		

Los resultados de la Tabla 6 muestran que en rectas (Ec. 8) la presencia de despeje lateral por si sola reduce la peligrosidad ($\beta_{1R} < 0$), el tipo de objeto incrementa la

peligrosidad aun cuando es poco significativo ($\beta_{2R} > 0$), el talud incrementa en mayor medida la peligrosidad que el tipo de objeto ($\beta_{3R} > 0$), y la presencia de despeje lateral en

zonas con taludes y objeto reduce la peligrosidad ($\beta_{AR}<0$), efecto que es diferenciado según el tipo de objeto presente en la ZL. En el caso de las curvas (Ec. 9), la presencia del despeje lateral reduce la peligrosidad pero en mayor medida que en rectas ($\beta_{1C}<0$). El efecto conjunto del despeje, presencia de curvas y dependiendo del tipo de objeto incrementa la peligrosidad ($\beta_{2C}>0$).

En conclusión, los modelos de las Ec. 8 y 9 resultan más convenientes que los modelos desarrollados en la sección 5.1, por lo cual fueron los seleccionados finalmente para explicar la peligrosidad en curvas y rectas.

6. Conclusiones

En este trabajo se analizaron y propusieron modelos para estimar la peligrosidad de las zonas laterales para vías bidireccionales de dos carriles. Para ello se identificaron las variables explicativas más importantes simulando el comportamiento de los índices RHR, RHI y RSI. Usando esta simulación y datos de campo tomados en Chile, se analizaron diferentes modelos de peligrosidad para luego proponer los tres modelos más consistentes en términos estadísticos y físicos.

Los resultados mostraron que por un lado los modelos obtenidos mediante simulación resultaron distintos de aquellos obtenidos mediante datos de terreno sin considerar interacción entre variables, lo cual era esperable considerando que los modelos existentes no consideraban la variable geometría, proximidad del obstáculo y los efectos combinados entre variables. En este sentido el modelo finalmente propuesto (Ecuaciones 8 y 9) resultó el más eficiente en términos estadísticos.

El método de análisis en base a simulación de escenarios aplicado en este trabajo, permitió identificar las variables relevantes comunes a los tres índices analizados, pero no permitió analizar el efecto de la presencia de curvas horizontales ni del tipo de obstáculo sobre la peligrosidad. Estos efectos se lograron incluir con datos de terreno tomados en 214 tramos en rutas de Chile.

El análisis de los datos de terreno se realizó usando modelos de regresión lineal generalizada. Se estudió el efecto sobre la peligrosidad los factores despeje lateral, talud, presencia y tipo de obstáculo, presencia de barreras, tráfico y efecto de las curvas en la peligrosidad. Los resultados mostraron que el nivel de tráfico (TMDA) no resultó significativo, lo cual es consistente con los modelos revisados en el estado del arte, que lo utilizan para calcular la exposición al riesgo más que para estimar la peligrosidad.

Se determinó que el despeje lateral explica en mayor medida la peligrosidad que el resto de factores especialmente en presencia de curvas. Asimismo, se determinó que la presencia de barreras en curvas con taludes pronunciados reduce la peligrosidad.

En rectas sin barreras laterales y con taludes el efecto del tipo de obstáculo es significativo para explicar la peligrosidad. En las curvas, se determinó que también es significativo para explicar la peligrosidad, pero en interacción con el despeje lateral.

En tanto no se disponga tales datos, el modelo propuesto permite realizar estimaciones adecuadas para: apoyar la decisión de incluir o no barreras de protección, la calificación del nivel de seguridad de segmentos de carreteras y la evaluación costo-efectividad de adopción de medidas de reducción de la peligrosidad.

Referencias

- [1] La Torre, F., Saleh, P., Cesolini, E. and Goyay, Y., Improving roadside design to forgive human errors, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, pp. 235–244, 2012.
- [2] Veith, G., *Roadside design, safety and barriers. Guide to Road Design: Part 6*, 1st ed., Sydney, AUSTRROADS, 2009.
- [3] Rivera, J.I., *Modelación de la peligrosidad en zonas laterales de caminos bidireccionales*, tesis (Magister en Ciencias de la Ingeniería), Chile, Universidad de Concepción, P. 372, 2013.
- [4] AEC. *Manual de buenas prácticas para el diseño de márgenes de carreteras convencionales*, 1a ed., España, Asociación Española de Carreteras, 2010.
- [5] Stonex, K.A., *Roadside design for safety*, HRB, 39, pp. 120 – 156, 1960.
- [6] Powers, R.D., Hall, J.W., Hall, L.E. and Turner, D.S., The “forgiving roadside” design of roadside elements, in *International Symposium on Highway Geometric Design Practices* (1st, 1995, Boston, United States), 1995.
- [7] WSDOT. *Roadside manual*, 1st ed., Olympia, Washington State Department of Transportation, 2012.
- [8] AASHTO. *Roadside design guide*, 4th ed., Washington D.C., American Association of State Highways and Transportation Officials, 2011.
- [9] Zegeer, C., Reinfurt, D., Hummer, J. and Stewart, R., Accident effects of sideslope and other roadside features on two-lane roads. *Transportation Research Record*, 1195, pp. 103-118, 1988.
- [10] Perandones, J.M. and Ramos, G., *Road safety index*, España, Fundación para la Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía. P. 64, 2008.
- [11] AASHTO *Highway safety manual Vol. 2*, 1st ed., Washington D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
- [12] Harwood, D.W., Council, F.M., Hauer, E., Hughes, W.E. and Vogt, A., *Prediction of the expected safety performance of rural two-lane highways*, United States, Federal Highway Administration, P.194, 2009.
- [13] Ayati, E., Pirayesh, M., Sadeghi, A. and Moghaddam, A.M., *Introducing roadside hazard severity indicator based on evidential reasoning approach*, *Safety Science*, 50, pp. 1618–1626, 2012.
- [14] Karpinski, J., *Main Roads roadside hazard rating*, in *ARRB Conference* (25th, 2005, Perth, Australia), 2012.
- [15] Pardillo, J., Domínguez, C. and Jurado, R., *Empirical calibration of a roadside hazardousness index for Spanish two-lane rural roads*, *Accident Analysis & Prevention*, 42, pp. 2018–2023, 2010.
- [16] Li, CH., Gao, H., Shen, S. and Qi, G., *Evaluation on roadside safety degree based on grey theory*, in *IEEE ITS Conference* (9th, 2006, Toronto, Canada), 2006.
- [17] Cafiso, S., La Cava, G. and Montella, A., *Safety evaluation process for two-lane rural highways*, *Transportation Research Record*, 2019, pp. 136–145, 2007.
- [18] Echaveguren, T. and Vargas-Tejeda, S., *A model for estimating advisory speeds for horizontal curves of two-lane rural roads*, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(12), pp. 1234–1243, 2013.
- [19] DV. *Volúmenes de Tránsito Plan Nacional de Censos 1994 – 2012* [online], Santiago, Chile. [Visitado Marzo 15, 2012]. Disponible en: <http://servicios.vialidad.cl/censo/index.htm>.