

# **EVALUACION DE PELIGROSIDAD EN ZONAS LATERALES. UN CASO DE ESTUDIO**

Tomás Echaveguren, Universidad de Concepción, techaveg@udec.cl  
Juan Ignacio Rivera, Universidad de Concepción, jignacioriverab@gmail.com

## **RESUMEN**

Las zonas laterales de carreteras son elementos destinados a reducir la severidad de accidentes por salida de pista. 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 en base a 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*

## **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 on the accident data availability. 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 of protection is relevant the type of object and its position measured position in the roadside.

*Keywords: lateral zones, hazardous, highways*

## 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 el 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 (Austroads, 2009; NRA, 2009; AASHTO, 2010; DGT, 2010). Este tipo de accidentes se conoce como accidentes por salida de calzada (*Run-off-Road Crashes*, ROR).

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 puede definir como peligrosidad, que corresponde a una medida indirecta del riesgo de accidentes, que depende del tipo de objeto o depresión presente en la zona lateral: 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, entre otros.

Por lo anterior, diversas normativas de diseño geométrico establecen especificaciones de diseño para la sección transversal de las carreteras que proporcionen ZL libres de depresiones y obstáculos de manera de transformarlas en un elemento de seguridad pasiva.

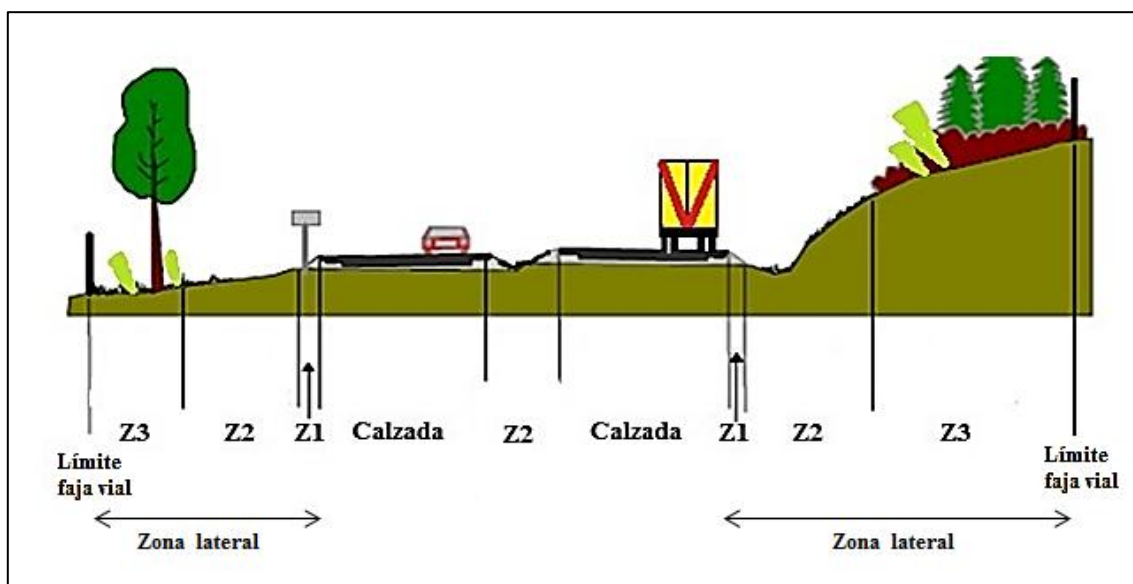
Las ZL como elemento de diseño geométrico nacieron en la década de los 60 en Estados Unidos. El “Consejo Nacional de Seguridad” estableció que más del 45 % de las muertes en accidentes de tránsito ocurría en dichas áreas y que por lo tanto era necesario adoptar medidas concretas de reducción de la mortalidad.

Es por ello que buscaron de manera experimental identificar los potenciales peligros mediante campos de prueba. Dichos campos de prueba se implementaron como parte un sistema de caminos privados desarrollados 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).

El primer estándar formal de diseño de ZL se publicó en 1988. La Guía de Diseño de Zonas Laterales (*Roadside design guide*) publicada por AASHTO (1988) estableció recomendaciones de diseño y un método sencillo de evaluación de peligrosidad (Powers et al, 1998). Para esto último, estableció un índice de peligrosidad (*Roadside Hazard Rating*, RHR) que variaba desde 1 (peligrosidad baja) hasta 7 (peligrosidad alta), en base a comparación de escenarios. Desde ese entonces, el concepto de ZL ha evolucionado hasta el enfoque moderno, que las define 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 la ZL están compuestas por 3 elementos (WSDOT, 1998): 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. Bajo el enfoque europeo, las ZL corresponden a Z1, Z2 y Z3 (La Torre et al, 2012).

Figura 1: Componentes de las zonas laterales (WSDoT, 1998)



Un aspecto importante para el diseño de ZL es el 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 tanto, el problema esencial es contar con un índice que permita calificar la peligrosidad y tomar decisiones en base a esa calificación: retirar obstáculos, cubrir depresiones y en última instancia, disponer de sistemas de contención lateral.

Los estudios realizados para evaluar los factores relacionados con 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 es realizar un análisis que permita identificar las variables que explican la peligrosidad en las ZL, mediante la modelación lineal de un Índice de Peligrosidad (IP).

## 2 LOS INDICES DE PELIGROSIDAD

Los índices de peligrosidad, intentan explicar el grado de peligro y la exposición al riesgo de accidentes. La literatura muestra poca experiencia acerca de la estimación de estos índices, siendo los más importantes los propuestos por Zeeger en 1988 (AASHTO, 2010) y Pardillo et al (2010). Existen otros índices de peligrosidad de zonas laterales que forman parte de indicadores de seguridad vial. Por ejemplo el índice RSI (*Road Safety Index*) de Cafiso et al (2007) es parte del indicador IS desarrollado en el marco del proyecto IASP (*Identificazione e Adeguamento delle Strade Pericolose*) de la Comunidad Europea. El índice de riesgo en zonas laterales descrito en Perandones y Ramos (2008) es parte del índice de seguridad vial del proyecto RANKERS de la Comunidad Europea.

## 2.1 El Índice RHR

El índice RHR (*Roaside Hazard Rating*) es una escala de calificación de peligros en las zonas laterales que varía de 1 a 7, siendo 1 la más baja y 7 la más alta. 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. La Tabla 1 muestra los criterios recomendados por AASHTO (2010) para estimar el valor del índice RHR.

Tabla 1: Criterios de calificación de RHR según AASHTO (2010).

RHR	Despeje lateral (m)	Talud	Recuperación del control	Característica de la zona lateral
1	$\geq 9$	menor a 1:4	Si	Nada
2	6 – 7.5	1:4	Si	Nada
3	3	1:3 a 1:4	Si	Superficie rugosa
4	1.5 – 3	1:3 a 1:4	Si	Barreras; árboles, postes, otros
5	1.5 – 3	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.

El índice RHR lo utiliza AASHTO (2010) para estimar el factor modificador de accidentes (FMA) por peligrosidad de zonas laterales, lo cual afecta el número potencial de accidentes/vehículo-km. Para el cálculo utiliza la expresión calibrada por Harwood et al (2000):

$$FMA = \frac{e^{-0.6869+0.0668RHR}}{e^{-0.4865}} \quad (1)$$

Para la condición base (RHR=3) el FMA es 1, lo que implica que es el nivel de peligrosidad que no modifica la accidentalidad. Para la peligrosidad más baja (RHR=1), el valor de FMA es 0.87, lo cual implica un aporte en la reducción de accidentalidad del 13 %. Para la peligrosidad más alta (RHR=7) FMA vale 1.31, lo cual implica un aumento potencial de accidentalidad del 31 %.

Karpinsky (2012) 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. Sobre la base de información recolectada en terreno 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 de peligrosidad RHI de Pardillo et al (2010) expresa la influencia de la configuración física de las ZL sobre la frecuencia y severidad de los accidentes por salida de calzada. El índice considera como variables el tipo de trazado geométrico, la inclinación del talud, el despeje lateral y la presencia de barreras de contención.

El índice 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 (2010) establecieron estos niveles en base a 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: Índice de peligrosidad de zonas laterales RHI (Pardillo et al 2010)

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 Pendiente 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 pendiente de talud entre 1:3 y 1:4 y obstáculos a menos de 3 m; curvas con pendiente de talud entre 1:3 y 1:4 y obstáculos entre 3 y 5 m; y curvas con pendiente de talud mayor que 1:3 y distancia a obstáculos mayor que 5 m
7	Tramos con pendiente de talud mayor a 1:3 y obstáculo a menos de 5 m o curvas con distancia a obstáculo menor de 3 m

Li et al (2006) desarrollaron un método similar al de Pardillo et al (2010) aplicando el análisis de conglomerados grises a 4 factores: trazado, tráfico, historia de accidentes por salida de calzada y características físicas de las zonas laterales.

## 2.3 El Factor de Severidad de Accidentes debido a Zonas Laterales

Este índice (FSA) se encuentra dentro del contexto del índice de seguridad de caminos bidireccionales (IS), el cual estima el nivel de seguridad de un segmento de carretera, combinando las tres componentes de riesgo: la exposición de los usuarios de la carretera a los peligros del camino, la probabilidad de que un vehículo esté involucrado en un accidente, y sus consecuencias en caso de ocurrir el accidente, como lo muestra la Ec. 2 (Cafiso et al, 2007).

$$IS = (\text{frecuencia})(\text{exposición})(\text{severidad}) \quad (2)$$

La exposición se calcula a lo largo de un segmento de carretera en función del tránsito medio diario anual (TMDA, en vehículos/día-año) y la frecuencia de accidentes se obtiene a partir de los datos de accidentabilidad existentes en el tramo a evaluar, en accidentes/año. El tercer factor involucrado es la severidad del accidente, la cual se representa en términos de la razón de la velocidad de operación ( $V_{85}$ ) con la velocidad de diseño ( $V_D$ ) y la peligrosidad de la zona lateral (RSI), según la Ec. 3.

$$FSA = \left( \frac{V_{85}}{V_D} \right) RSI \quad (3)$$

La peligrosidad de la zona lateral se estima mediante la Ec. 4, 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 y  $\Delta AS$  es el aumento relativo en la severidad del accidente. El valor de P depende de cada país. Cafiso et al (2007) utiliza el valor  $P = 0.3$  para el caso de Italia. Asimismo, de acuerdo a Elvik y Vaa (2004),  $\Delta AS$  asume el valor 2.

$$RSI = 1 + (WS)(P)(\Delta AS) \quad (4)$$

La puntuación ponderada (WS) de los peligros de las ZL se obtiene mediante la Ec. 5 para el tramo de muestreo k del camino.

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

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 y 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 (Cafiso et al, 2007). El factor de ponderación w se obtiene de la Tabla 3.

Tabla 3: Peso relativo de los elementos de las zonas laterales (Cafiso et al, 2007)

Elemento	w
Talud	3
Puentes	5
Terminales y transiciones	2
Árboles, postes y obstáculos	2
Zanjas	1

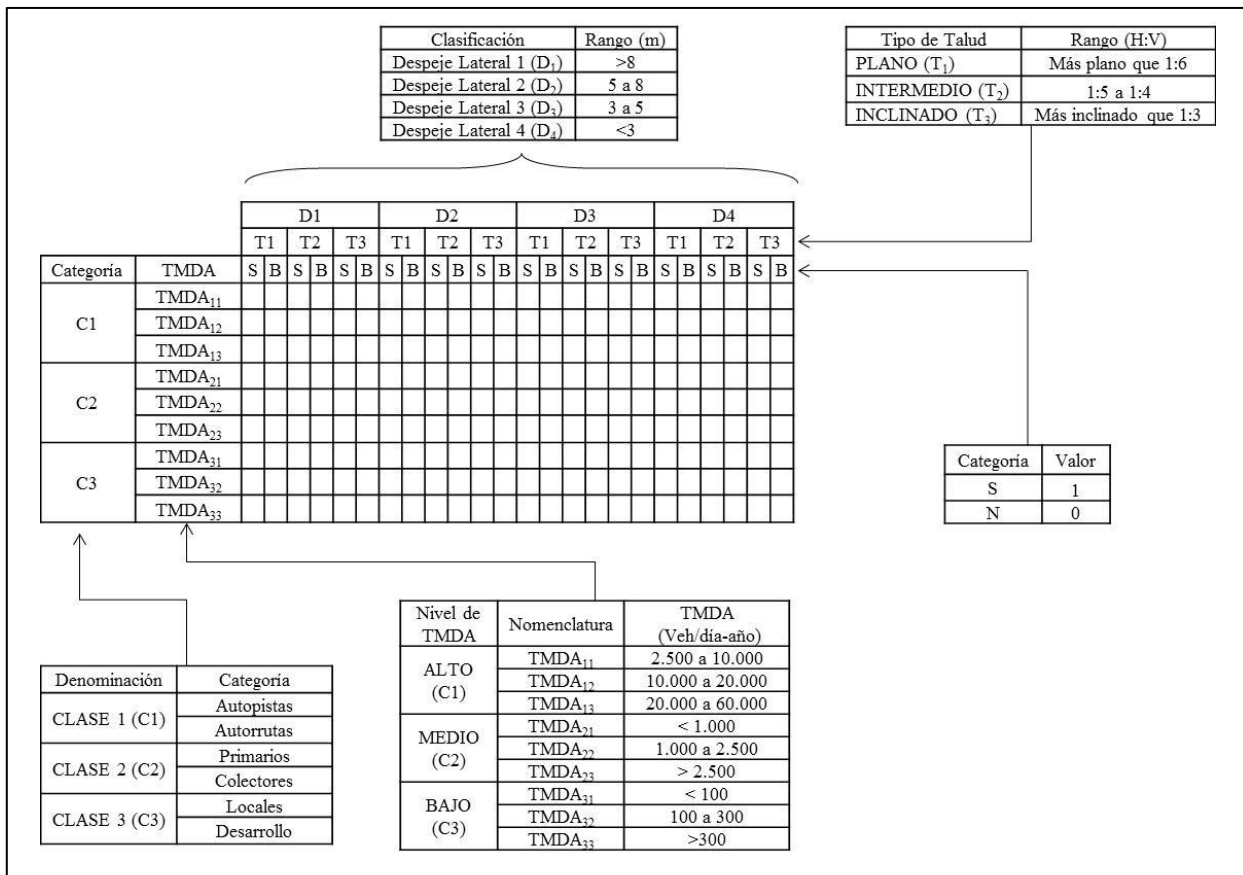
### 3 ANALISIS DE INDICES DE PELIGROSIDAD EXISTENTES

Se realizó un análisis de los modelos de Zeeger (AASHTO, 2010), Cafiso et al (2007) y Pardillo et al (2010) mediante estudio de escenarios, a partir de la cual se propusieron especificaciones funcionales iniciales del índice y lograr así identificar el efecto de las diversas variables sobre la peligrosidad en las ZL y definir a priori las variables a medir 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 a 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.

La Figura 2 muestra las variables de entrada de los escenarios de cálculo considerados en el análisis. Las celdas de la matriz de la figura representan valores individuales de IP calculados mediante los modelos descritos anteriormente para diferentes valores de los datos de entrada muestreados dentro de los rangos de cada una de ellas. Considerando 2 repeticiones por celda, se obtuvieron 430 valores de IP.

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



Se realizó un análisis de regresión de los valores de IP obtenido para cada una de las categorías Ci establecidas en el análisis de escenarios. Los resultados obtenidos se aprecian en las Ecuaciones 6, 7 y 8 para las categorías de diseño alta (C1), media (C2) y baja (C3). El coeficiente de regresión obtenido en los tres modelos es superior a 0.7 y el error resultante fue de 0.9.

En las Ecuaciones 6, 7 y 8, 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.

$$IP(C1) = \underset{(13.7)}{3.024} + \underset{(7.7)}{4.132 \times 10^{-5}} TMDA - \underset{(-16.9)}{0.345} DESPEJE + \underset{(11.8)}{5.548} TALUD - \underset{(-2.1)}{0.278} BARRERA \quad (6)$$

$$R^2_a = 0.77; \quad S = 0.9; \quad N = 144$$

$$IP(C2) = \underset{(14.5)}{3.634} + \underset{(3.1)}{9.394 \times 10^{-5}} TMDA - \underset{(-17.6)}{0.419} DESPEJE + \underset{(5.8)}{3.173} TALUD - \underset{(-0.98)}{0.153} BARRERA \quad (7)$$

$$R^2_a = 0.71; \quad S = 0.9; \quad N = 144;$$

$$IP(C3) = \underset{(15.4)}{3.820} + \underset{(0.3)}{8.455 \times 10^{-5}} TMDA - \underset{(-17.6)}{0.420} DESPEJE + \underset{(4.5)}{2.500} TALUD - \underset{(-0.6)}{0.097} BARRERA \quad (8)$$

$$R^2_a = 0.70; \quad S = 0.9; \quad N = 144;$$

Las ecuaciones anteriores se obtuvieron a partir del estudio de escenarios posibles descritos en la Figura 2 y considerando rangos de las variables de acuerdo a los estándares de diseño geométrico de Chile. Asimismo, se consideraron las variables explicativas comunes a todos los métodos. Por esto, dos variables potencialmente relevantes como son la existencia de curvas horizontales y la clasificación por tipo de objeto no fueron analizados en esta parte del trabajo.

#### 4 TOMA DE DATOS EN TERRENO

La recopilación de datos de terrenos se ejecutó sobre tramos de medición de 100 m de longitud que consideraban los elementos curvos utilizados por García (2012) y elementos rectos aledaños. De este modo, se obtuvieron inicialmente 236 tramos de medición. Posteriormente, a través de una selección directa en terreno se seleccionaron los tramos 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, con lo cual las mediciones se realizaron finalmente en 214 tramos.

Las variables medidas en terreno fueron el despeje lateral, el talud transversal, tipo de obstáculo, la presencia de barreras de contención y la geometría de la vía.

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 el ángulo promedio de inclinación del talud en gradianes, el cual posteriormente se traduce a inclinación 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 barrera contención y la geometría se obtuvieron por identificación visual. Se registró presencia / ausencia de barreras de contención y la presencia de una recta (R) o de una curva (C).

La Tabla 5 resume los resultados obtenidos en el trabajo de terreno. En ella se muestran el número de tramos de medición (# TM) los rangos de valores de despeje lateral, de inclinación de talud y TMDA, la presencia y ausencia de barreras, el tipo y numero de objetos presentes, el número de curvas y de rectas.

Tabla 5: Resumen de datos obtenidos en las mediciones en terreno

Ruta	# TM	DESPEJE (m)	TALUD (decimal)	TMDA (veh/día-año)	BARRERAS	Obstáculo en ZL (#)	# Curvas	# Rectas
1	11	0.5 – 3.5	0.25 – 1.00	5765	0 – 1	Árbol (1), Corte (6), Zanja (3), O. de Arte (1)	7	4
2	27	1.0 – 3.5	0.17 – 1.00	56 – 3198	0	Poste (14), Zanja (6), Rocas (3), Árbol(3), Canal (1)	13	14
3	21	1.0 – 3.0	0.25 – 0.33	3043	0	Poste (8), Zanja (3), Rocas (2), Árbol(4), Vegetación (6)	7	14
4	81	0.5 – 8.0	0.25 – 1.00	2004 – 2770	0 – 1	Poste (15), Zanja (13), Rocas (29), Árbol(13), Vegetación (9)	26	55
5	74	1.0 – 8.0	0.17 – 1.00	75 – 7015	0 – 1	Poste (15), Zanja (36), Rocas (10), Árbol(11), Vegetación (2)	23	51

## 5 ANALISIS DE FACTORES INCIDENTES EN LA PELIGROSIDAD

Para realizar éste análisis se utilizaron los datos obtenidos en terreno y los resultados obtenidos en el análisis de escenarios. Teniendo en cuenta que todos los índices analizados convergen a las Ecuaciones 6, 7 y 8 para diversos escenarios, se analizaron los efectos de los factores DESPEJE, BARRERAS, TALUD, TMDA y GEOMETRIA sobre la peligrosidad calificada aplicando el modelo de Pardillo et al (2010).

Este modelo se seleccionó debido a que incorpora de manera simple las características físicas de las ZL lo cual facilita el trabajo de levantamiento de información en terreno para realizar evaluaciones. Para el análisis de los efectos de los factores se utilizó la regresión general, que

permite realizar modelos lineales y aditivos introduciendo variables categóricas, binarias y aplicar directamente funciones de transformación para normalizar residuos mal comportados e incluir interacciones entre variables.

### 5.1 Efecto sobre la peligrosidad del tráfico, despeje lateral, talud, presencia de barreras y geometría independientemente del tipo obstáculo lateral

En esta parte del análisis se especificó el modelo lineal de la Ec. 9. La Tabla 6 muestra los resultados de la regresión para un modelo lineal sin interacción entre variables.

$$IP = \beta_0 + \beta_1 TMDA + \beta_2 DESPEJE + \beta_3 TALUD + \beta_4 BARRERA + \beta_5 GEOMETRIA \quad (9)$$

Tabla 6: Resultados del análisis de regresión de modelo lineal sin interacciones

Modelo 1: Todas las variables excepto GEOMETRIA				
Coefficiente	Valor	Valor t	Valor p	Comentario
$\beta_0$	+7.27	+32.1	0.000	Significativo
$\beta_1$	-0.00006	-1.41	0.157	No significativo
$\beta_2$	-0.94	-15.0	0.000	Significativo
$\beta_3$	+0.89	+3.0	0.003	Significativo
$\beta_4$	+0.83	+2.3	0.024	Significativo
$\beta_5$	0.00	0	0	
S = 1.2	$Ra^2 = 0.54$	N=213		
Modelo 2: Todas las variables excepto TMDA y GEOMETRIA				
Coefficiente	Valor	Valor t	Valor p	Comentario
$\beta_0$	+7.13	+34.6	0.000	Significativo
$\beta_1$	0.0	0.0	0.000	
$\beta_2$	-0.96	-15.5	0.000	Significativo
$\beta_3$	+0.78	+2.1	0.034	Significativo
$\beta_4$	+0.86	+2.85	0.005	Significativo
$\beta_5$	0.0	0.0	0.000	
S = 1.1	$Ra^2 = 0.53$	N=213		
Modelo 3: Todas las variables excepto TMDA				
Coefficiente	Valor	Valor t	Valor p	Comentario
$\beta_0$	+7.1	+42.9	0.000	Significativo
$\beta_1$	0.0	0.0	0.000	
$\beta_2$	-1.05	-20.0	0.000	Significativo
$\beta_3$	+0.29	+1.1	0.290	No significativo
$\beta_4$	-0.18	-0.8	0.417	No significativo
$\beta_5$	+1.46	+11.6	0.000	Significativo
S = 0.8	$Ra^2 = 0.76$	N=213		

El modelo 1 muestra que la variable TMDA no resulta significativa, por lo cual puede eliminarse del análisis. Se aprecia también que al incorporar la variable GEOMETRIA (Modelo 3), la calidad del modelo mejora sustancialmente respecto del Modelo 2, pero pierde significancia las

variables BARRERA y TALUD. Esto implica que por sí mismas, estas variables no contribuyen a explicar la peligrosidad de las zonas laterales.

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 los resultados previos, se incluyó en el análisis la interacción entre variables. Para especificar estas interacciones se asumió lo siguiente:

- La inclinación del talud protegido con barrera en rectas incrementan 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.

Considerando estos supuestos se analizó el modelo de interacción de la Ec. 10. Los resultados de la regresión se resumen en la Tabla 7. Estos no consideran el tipo de obstáculo presente en la ZL.

$$IP = \beta_0 + \beta_1 \text{DESPEJE} + \beta_2 (\text{BARRERAS})(\text{TALUD}) + \beta_3 (\text{GEOMETRIA})(\text{TALUD}) + \beta_4 (\text{GEOMETRIA})(\text{TALUD})(\text{BARRERAS}) \quad (10)$$

Tabla 7: Resultados del análisis de regresión de modelos lineales con interacciones

Coefficiente	Valor	Valor t	Valor p	Comentario
$\beta_0$	+7.16	+57.0	0.000	Significativo
$\beta_1$	-0.93	-19.9	0.000	Significativo
$\beta_2$	+3.76	+7.2	0.000	Significativo
$\beta_3$	+2.26	+9.8	0.000	Significativo
$\beta_4$	-4.33	-6.6	0.000	Significativo
S = 0.8	Ra <sup>2</sup> = 0.74	N=213		

Los resultados de la Tabla 7 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 ( $\beta_2 > 0$ ).

## 5.2 Efecto del tipo de objeto sobre la peligrosidad en rectas y curvas sin elementos de protección

Para analizar el efecto de estos factores se especificaron 2 modelos 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. 10 y 11. La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos mediante regresión generalizada.

$$IP = \beta_{0R} + \beta_{1R} \text{DESPEJE} + \beta_{2R} \text{OBJETO} + \beta_{3R} \text{TALUD} + \beta_{4R} (\text{DESPEJE})(\text{OBJETO})(\text{TALUD}) \quad (11)$$

$$IP = \beta_{0C} + \beta_{1C} \text{DESPEJE} + \beta_{2C} (\text{DESPEJE})(\text{GEOMETRIA})(\text{OBJETO}) \quad (12)$$

Tabla 8: Resultados del análisis del efecto del tipo de objeto en rectas y curvas sin barreras

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

Los resultados de la Tabla 8 muestran que en rectas la presencia de despeje lateral por si solo 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 ( $\beta_{4R} < 0$ ), efecto que es diferenciado según el tipo de objeto presente en la ZL.

En el caso de las curvas, la presencia del despeje lateral reduce la peligrosidad pero en mayor medida que en rectas ( $\beta_{1C} < 0$ ) y el efecto conjunto del despeje, presencia de curvas y dependiendo del tipo de objeto se incrementa la peligrosidad ( $\beta_{2C} > 0$ ).

## 6 CONCLUSIONES

Este trabajo discute los principales factores que contribuyen a aumentar o disminuir la peligrosidad en las zonas laterales. Atendiendo a que datos de diversos países revelan que entre un 25 y un 45 % de los accidentes con fatalidades ocurren por salida de pista, las zonas laterales de las carreteras constituyen importantes elementos de seguridad que, siendo bien diseñados, pueden reducir las fatalidades y la severidad de los accidentes de vehículos que terminan en las

zonas laterales después de salirse de su pista. En este sentido, no solo el identificar los factores de riesgo sino que también el cuantificar la peligrosidad, proporciona una herramienta concreta para mejorar el nivel de seguridad de las carreteras.

La cuantificación de índices de peligrosidad y su aplicación práctica nace con la implementación en Estados Unidos de la *Roadside Design Guide* y posteriormente del *Highways Safety Manual*, introduciendo formalmente en la normativa el aporte a la seguridad de las zonas laterales, posteriormente se han desarrollado indicadores derivados de aquellos desarrollados en Estados Unidos, que lo integran a la evaluación de riesgo de accidentes de las rutas mediante instrumentos concretos como son las inspecciones de seguridad vial y la evaluación de la velocidad de operación en función de la geometría.

El análisis de escenarios 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 analizaron con datos de terreno tomados en rutas de la región del Bio Bio.

El análisis de los datos de terreno se realizó mediante regresión generalizada, y tuvo por objetivo estudiar 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 significativa, 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 la estimación de 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 cuanto al efecto del tipo de objeto, se determinó que en rectas sin barreras de protección y en presencia de taludes es significativo para explicar la peligrosidad. En el caso de las curvas, se determinó que también es significativo para explicar la peligrosidad en interacción con el despeje lateral.

Los resultados obtenidos permiten visualizar que con una inspección de terreno más detallada y aumentando los tamaños muestrales es posible construir un modelo detallado de estimación de peligrosidad. En este sentido, el contar con datos de accidentes por salida de pista permitirá mejorar la estimación, dato con el que no se contó en este trabajo.

De este modo, en tanto se disponga del modelo antes citado, será posible entre otras cosas apoyar la decisión de inclusión de 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

- AASHTO (2010) **Highway Safety Manual**. American Association of State Highway and Transportation Officials. Estados Unidos.
- AASHTO (2011). **Roadside Design Guide**. American Association of State Highways and Transportation Officials. Washington, Estados Unidos.
- AUSTROADS (2009) **Roadside Design, Safety and Barriers**. Guide to Road Design: Part 6 Sydney. Australia.
- Cafiso, S., La Cava, G. y Montella A. (2007) Safety evaluation process for two-lane rural highways. **Transportation Research Record**, 2019, 136 – 145.
- DGT (2010) **Manual de buenas prácticas para el diseño de márgenes de carreteras convencionales**. Dirección General de Tráfico, Ministerio del Interior. España.
- Elvik, R. y Vaa, T. (2004) **The handbook of road safety measurements**. Elsevier. Reino Unido.
- García, C. (2012) **Determinación de velocidades límite en curvas horizontales usando el equipo Ball Bank**. Memoria de Título. Universidad de Concepción. Concepción.
- Harwood, D.W., Council, F.M. Hauer, E. Hughes, W.E. Vogt, A. (2009) **Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two-Lane Highways**, Informe. FHWA-RD-99-207. Federal Highway Administration. Estados Unidos.
- Karpinski, J. (2012) MAIN ROADS roadside hazard rating. **25th ARRB Conference**. (Cd-Rom). 23-26 Septiembre 2012, Perth.
- La Torre, F., Saleh, P., Cesolini, E., y Goyay, Y. (2012) Improving roadside design to forgive human errors, **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, 53, 235 – 244
- Li, Ch., Gao, H., Shen, S. y Qi, G. (2006) Evaluation on roadside safety degree based on grey theory. **2006 IEEE ITS Conference** (Cd-Rom). 17 – 20 Septiembre 2006, Toronto.
- NRA (2009) **Annual Report 2008**. The South African Nation Roads Agency Limited. Pretoria. Sudáfrica.
- Pardillo, J. Domínguez, C. y Jurado. R. (2010) Empirical calibration of a roadside hazardousness index for Spanish two-lane rural roads. **Accident Analysis & Prevention**, 42, 2018 – 2023.
- Perandones, J.M. y Ramos, G. (2008) **Road Safety Index**. Deliverable D4.2. Ranking for European Road Safety. European Community España.
- WSDoT (1998) **Roadside Manual**. Washington State Department of Transportation. Estados Unidos.