
ESTUDIO DE RELACIONES VELOCIDAD – GEOMETRIA HORIZONTAL EN VIAS DE LA VIII REGION

Tomás Echaveguren Navarro

Jessica Saez Cárdenas

Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Civil, P.O. Box 160 – C, Correo 3,
Concepción, Fono: (41)20.43.20, Fax: (41)25.25.24, email: techaveg@udec.cl

RESUMEN

El uso de relaciones velocidad - geometría es fundamental en la construcción de perfiles de velocidad y análisis de consistencia. Diversas investigaciones realizadas en el mundo, se han orientado a analizar las influencias que ejerce el diseño sobre la elección de velocidad del conductor. Sobre esta base, se han elaborado numerosas relaciones entre velocidad de percentil 85 y elementos geométricos del trazado horizontal, llegándose a verificar empíricamente estas influencias.

En el presente artículo, se presenta una síntesis de la investigación realizada por los autores en diversos caminos en la VIII Región del Bío Bío en Chile.

Se realiza una revisión somera de los modelos más relevantes estimados por diversos investigadores en el mundo, a partir de los cuales se definen especificaciones básicas de modelos que relacionan la velocidad de percentil 85 con respecto a variables geométricas.

Se presenta una síntesis del análisis estadístico de la distribución de velocidades medidas en 30 sitios, el cual puede servir como un aporte a los procedimientos actuales de estimación de velocidad para diversos percentiles.

Teniendo en cuenta las estimaciones de Velocidad de percentil 85 y la restitución topográfica de los sitios muestreados, se realiza un análisis de regresión a partir del cual se obtuvieron tres modelos fundamentales, los cuales son comparados entre sí y con otros modelos previamente descritos.

A partir del estudio se concluyó finalmente que la condición geométrica horizontal de un trazado, condiciona la velocidad que el conductor selecciona al circular por él, motivo por el cual es necesario ampliar las investigaciones a fin de establecer más precisamente el efecto de las variables analizadas.

1. INTRODUCCION

La Consistencia es una condición de importancia en la provisión de seguridad en el diseño geométrico. Se define como la condición bajo la cual una vía se encuentra en armonía con las expectativas de los conductores (Irizarry y Krammes, 1998). Vale decir, la condición bajo la cual el diseño geométrico permite al conductor circular a una velocidad cercana a la de diseño, en ausencia de cambios drásticos de velocidad y trayectoria forzados por el diseño.

Aún cuando se han aplicado en las diversas normas indicadores de consistencia basados en características geométricas, los estudios de Mclean (1981) y Lamm *et al* (1999) muestran su insuficiencia. Resaltan la necesidad de incluir el análisis de brechas entre velocidad de diseño y operación dentro del proceso de diseño, a fin de identificar las diferencias entre ambas velocidades considerando las restricciones del trazado, proponiendo para ello el uso del perfil de velocidad.

El perfil de velocidad, corresponde a un diagrama de velocidad versus distancia, en el cual se asocia la velocidad y sus variaciones (aceleraciones o deceleraciones) con el alineamiento (horizontal y/o vertical) (Fitzpatrick *et al*, 2000). Al superponer un perfil de velocidad de circulación sobre el de diseño, es posible comparar las diferencias existentes entre ambas velocidades a lo largo de un trazado. Es posible así identificar sitios críticos y en donde estas diferencias pueden inducir un mayor riesgo en la conducción.

En el perfil de velocidades de circulación, la variable básica la velocidad de percentil 85 (V85) asumiendo que ésta es una buena estimación de la velocidad de circulación (McLean, 1981). Se define como la velocidad bajo la cual circula el 85 por ciento de los conductores (Roess *et al*, 1998).

Este trabajo, constituye el punto de partida para la elaboración de criterios de análisis de consistencia en el diseño, que es la determinación de las relaciones entre velocidad y geometría. En el presente trabajo, se aborda la discusión de una parte investigación realizada por los autores, relativa a la estimación de relaciones empíricas entre la velocidad de percentil 85 y el alineamiento horizontal.

2. RELACIONES VELOCIDAD - GEOMETRIA

Las relaciones entre velocidad y geometría se han obtenido en diversos estudios empíricos en el mundo. En tales estudios, se identifican tres etapas de análisis. Toma de Datos de Terreno, Procesamiento Estadístico y Análisis de Resultados.

Las variables comúnmente consideradas, son el radio y el grado de curvatura. La mayoría de los modelos estiman la velocidad en el punto medio de la curva y en escasas circunstancias en puntos interiores. De hecho, Islam y Seneviratne (1994) concluyeron que es uno de los aspectos que limita la aplicabilidad de estudios de este tipo, puesto que no consideran los valores reales de aceleración y deceleración en el interior de la curva. Los autores desarrollaron expresiones para tres puntos dentro de una curva. En Tabla 1 se muestra la expresión asociada al punto medio.

En Tabla 1, se puede apreciar algunos de los modelos especificados por diversos autores, incluyendo el país de origen, número de sitios muestreados, número de observaciones y valores del coeficiente determinación ajustado obtenidos. Se puede apreciar que la tendencia es considerar en la mayoría de los casos expresiones polinomiales.

Tabla 1: Síntesis de Modelos de Estimación de V85

Autor	País	Estimación	N	Obs.	R ²
McLean (1981)	Australia	$V_{85} = 53.8 + 464V_F - 3.26 \times 10^3/R + 8 \times 10^4/R^2$	20	100	0.92
Islam y Seneviratne (1994)	Estados Unidos	$V_{85} = 103.03 - 2.41D - 0.029D^2$	8	125	0.98
Kanellaidis (1990)	Grecia	$V_{85} = 109.09 - 2,197D$	58	200	0.65
		$V_{85} = 129.88 - 623.1/\sqrt{R}$			0.78
Cardoso (1998)	Portugal	$V_{85} = 75.52 - 322.68/\sqrt{R} + 6.41B + 0.325V_{,85}$	60	--	0.93
Irizarry y Krammes (1998)	Estados Unidos	$V_{85} = 105.86 - 3559.58/R$	12	--	0.84
Voigt y Krammes (1998)	Estados Unidos	$V_{85} = 103.6 - 3405/R$	138	100	0.80
		$V_{85} = 102.4 - 2742/R - 0.012L - 0.10\Delta$			0.82
		$V_{85} = 102.00 - 3632/R + 40.33e$			0.81
Pasetti y Fambro (1999)	Estados Unidos	$V_{85} = 103.90 - 3020.5/R$	51	100	0.68

D: Grado de Curvatura; R: Radio; V_{,85}: V85 en tangente; L: Longitud de curva; Δ: Deflexión; e: Peralte;

V_F: Velocidad Deseada; N: Número de sitios; Obs.: Número de observaciones por sitio.

Uno de los modelos de Voigt y Krammes (1998) incluye el peralte como variable explicativa. Dicha ecuación, muestra que la presencia de peraltes induce un aumento de la velocidad. Sin embargo, la evidencia empírica ha mostrado que es más conveniente tratar el peralte por separado mediante el uso de modelos logarítmicos para analizar la estabilidad dinámica (Lamm *et al*, 1999).

Los modelos velocidad – geometría de Tabla 1, constituyen una corriente de investigación orientada específicamente al estudio de la consistencia en el diseño. No obstante lo cual, también se han aplicado modelos de ese tipo en el cálculo de velocidad en condición de flujo libre en los sistemas de gestión de pavimentos HDM – 3 y 4. Su cálculo se inserta dentro de los submodelos VOC (*Vehicle Operating Cost*; HDM - 3) y RUE (*Road Users Effects*; HDM –4) a través del parámetro VDRIVE, que representa la velocidad límite restringida por la curvatura del alineamiento (Bennett, 1996).

En particular, el modelo VOC especifica VDRIVE a partir de la ecuación de equilibrio dinámico de un móvil desplazándose en una curva. Este modelo fue adaptado en Chile en 1990 y 1999 considerando las características del parque vehicular nacional (Ver Cruzat y Vargas, 1990). La ecuación de VDRIVE empleada en el submodelo RUE en tanto, ha sido calibrada por Bennet y McLean con datos de Nueva Zelandia (Bennett, 1996).

3. MODELOS ESTIMADOS

La estimación de relaciones entre velocidad y geometría, se realizó considerando tres casos:

Caso 1: Medición de Velocidad en el punto medio de una curva para todo tipo de vehículos

Caso 2: Medición en tres puntos de una curva (inicio, mitad y fin de curva) para todo tipo de vehículos.

Caso 3: Medición en el punto medio de una curva para vehículos livianos y pesados.

Cada caso, requiere de una cantidad mínima de datos de velocidad a tomar en cada punto de medición y un número mínimo de sitios para un nivel de confianza dado y un margen de error preestablecido. Islam y Seneviratne (1994), sugieren determinar el tamaño muestral a partir de la desviación estándar respecto de la mediana de la distribución de velocidad, con valores de hasta 14 Km./h.

Se determinaron tamaños muestrales mínimos asumiendo una distribución de probabilidades normal, para errores entre 5 y 15 % y niveles de confianza entre 90 y 95 %, aplicando así criterios netamente estadísticos.

3.1. Toma de Datos

Se formularon restricciones con el objetivo de establecer características de los puntos de muestreo tales que V85 no se vea afectada por otras variables (Sáez, 2001). De este modo, se consideraron los siguientes criterios:

- (a) Volumen de Tránsito Inferior a 5000 vehículos/día;
- (b) intervalo mínimo entre vehículos de 5 s;
- (c) ausencia de Accesos;
- (d) terreno Plano ($i < 4 \%$);
- (e) pavimento en buen estado.

Para identificar los sitios se estudiaron las Rutas O – 50, 148, 156 y 160, localizadas en la Octava Región de Chile. Se emplearon finalmente 30 sitios que cumplieran con las restricciones, distribuidos como se muestra en Figura 1. En todos los casos, se tomaron datos en las pistas exterior e interior, duplicando así el tamaño muestral¹.

En cada sitio se tomaron muestras de velocidad instantánea, con un mínimo de 30 observaciones por sitio, tomando en cuenta el tamaño muestral mínimo establecido estadísticamente para cada uno de los tres casos a analizar.

Asimismo, se realizaron levantamientos topográficos restituir los parámetros de diseño geométrico, salvo en las Rutas 156 y 160 en las cuales se contó con el estudio de ingeniería.

¹ También es posible aplicar técnicas de muestreo aleatorio para ampliar el tamaño de la muestra, como el empleado por McFadden y Elefteriadou (1997). Sin embargo, los mismos autores afirman que esto no garantiza una mejora en la representatividad de las estimaciones.

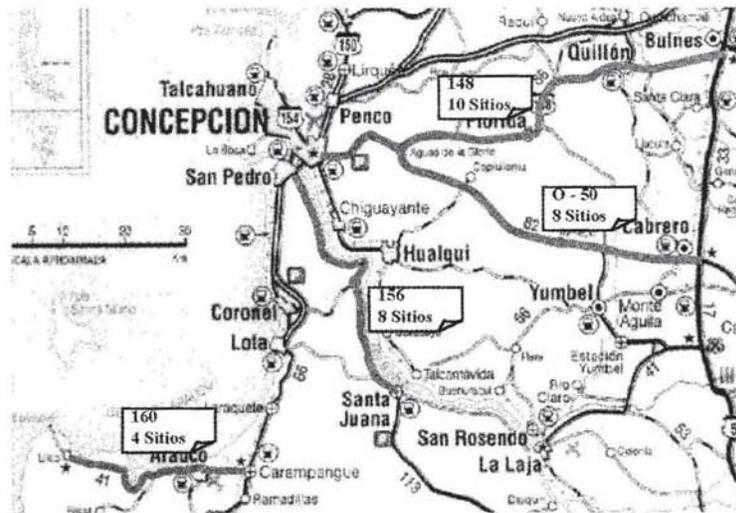


Figura 1: Sitios de Muestreo considerados en el estudio (Sáez, 2001)

3.2. Estimación de Velocidad de Percentil 85

En la mayoría de los estudios de velocidad se analiza el comportamiento estadístico de los datos. Las pruebas comúnmente empleadas son las de Shapiro - Wilk y los test conjuntos de Curtosis (*Kurtosis*) y Asimetría (*Skewness*), destinados a verificar si los datos de velocidad se ajustan a la distribución normal de probabilidades (Fitzpatrick y otros, 2001). En la presente investigación se aplicó el segundo grupo de pruebas.

Los resultados de este análisis para el conjunto de datos del caso 3 (correspondientes a vehículos livianos) se muestran en Tabla 2.

Se aprecia que en los sitios 9, 11, 14 y 16, los coeficientes de Curtosis son superiores a 1 pero los de asimetría son inferiores a 1, por lo cual la distribución de velocidades se asumió aproximadamente normal. Con esto fue posible estimar la velocidad de percentil 85 (V85) aplicando el procedimiento de Roess *et al* (1998), mediante el uso de planillas de cálculo.

En la Tabla, se aprecia también que para Velocidades de Diseño (VD) superiores a 100 Km./h, tanto V85 como la velocidad media son inferiores, en tanto que para velocidades de diseño inferiores a 100 Km./h, tanto V85 como la velocidad media resultan superiores.

Sin embargo, no es posible afirmar que el punto de cambio de tendencia se encuentra exactamente en los 100 Km./h, dado el tamaño de la muestra empleado. No obstante lo cual, sí es posible afirmar que se replica la tendencia encontrada por McLean (1981) e Islam y Seneviratne (1994) en estudios realizados en Australia y Estados Unidos, respectivamente.

Tabla 2: Resumen de Resultados de Estimación de V85 (Sáez, 2001)

Sitio	VD	V85	Vm	S	S ²	Ck	Cs
1	70	79,8	71,8	8,0	63,6	0,77	-0,90
2	70	84,2	75,0	9,6	92,8	-0,89	0,22
3	70	85,6	75,6	8,4	71,3	-0,95	0,24
4	70	84,2	75,4	8,1	65,4	0,81	0,77
5	50	68,0	62,3	6,7	44,2	0,11	-0,33
6	40	56,0	50,1	5,2	27,4	-0,80	-0,52
7	40	68,0	60,2	7,5	55,6	-0,70	0,15
8	70	89,0	80,1	8,2	66,8	-0,55	0,29
9	70	89,0	80,2	8,3	69,3	-1,09	-0,48
10	70	85,0	74,6	8,1	65,2	-0,47	0,55
11	70	91,9	79,1	11,7	136,9	-1,36	0,16
12	70	86,2	75,4	12,2	149,1	0,18	-0,92
13	100	98,8	92,7	6,9	47,2	-0,55	-0,15
14	100	90,8	80,8	9,9	98,1	-1,30	-0,09
15	56	85,0	74,9	9,5	90,5	-0,81	0,27
16	73	97,0	85,9	9,1	83,6	-1,98	0,20
17	73	90,9	84,3	9,2	83,7	-0,18	0,49
18	73	89,8	80,9	9,9	98,0	0,16	0,60
19	60	87,6	75,4	9,9	98,7	0,15	0,82
20	60	81,4	73,9	5,9	34,5	0,62	-0,56
21	60	87,5	74,7	10,3	106,4	-0,92	0,12

VD: Velocidad de Diseño (Km./h); V85: Velocidad de Percentil 85 (Km./h);
 Vm: Velocidad media (Km./h); S: Desviación Estándar (Km./h); S² Varianza (Km./h)²;
 Ck: Coeficiente de Curtosis; Cs: Coeficiente de Asimetría.

3.3. Especificación de Modelos

La especificación de modelos se realizó considerando los casos de análisis señalados anteriormente y por otro, considerando las variables significativas identificadas por otros investigadores. Para cada una de las tres categorías de modelos especificados por Sáez (2001) existen al menos seis posibles combinaciones, llegándose a un total de 24. En el presente artículo se incluyeron sólo las especificaciones asociadas a modelos lineales respecto de los coeficientes. Estos se muestran en Tabla 3.

Tabla 3: Especificación de Modelos V85 - Geometría (Adaptado de Sáez, 2001)

Especificación de Modelos			
1	$V85 = \beta_0 + \beta_1 * R + \epsilon$	4	$V85 = \beta_0 + \beta_1 * W + \beta_2 * L_T + \epsilon$
2	$V85 = \beta_0 + \beta_1 * R + \beta_2 * W + \epsilon$	5	$V85 = \beta_0 + \beta_1 * (1/R) + \epsilon$
3	$V85 = \beta_0 + \beta_1 * R + \beta_2 * W + \beta_3 * L_T + \epsilon$	6	$V85 = \beta_0 + \beta_1 * (1/\sqrt{R}) + \epsilon$

85: Velocidad de Percentil 85 (Km./h); R: Radio (m), W: Angulo de deflexión (grados); L_T: Longitud total de la curva (m); β_i: coeficientes; ε error de la estimación

3.4. Resultados

En Tabla 4 se muestran los resultados asociados al caso 3 para vehículos livianos. Se aprecia que las especificaciones obtenidas poseen una buena significancia estadística, al poseer un valor de R^2 ajustado igual a 0,84. Los valores obtenidos al aplicar la prueba F son altos, al igual que los valores t de student. En el caso de la ecuación 1, este hecho muestra que no existe redundancia entre las variables explicativas. Tomando en cuenta el número de sitios analizados, se estima que tal especificación posee un buen comportamiento.

Tabla 4: Relaciones Velocidad – Geometría Estimadas para vehículos livianos

Ec - 1	$V_{85} = 87.18 - 0.31W + 0.05L_T$	
	(40.04)	(-10.15) (3.39)
$R^2_a = 0.84$	F = 55	S = 3.92
Ec - 2	$V_{85} = 95.08 - 1879.93/R$	
	(70.16)	(-10.18)
$R^2_a = 0.84$	F = 103.46	S = 4.01
Ec - 3	$V_{85} = 108.46 - 341.01/\sqrt{R}$	
	(43.64)	(-10.27)
$R^2_a = 0.84$	F = 105.41	S = 3.99

V_{85} : Velocidad de Percentil 85 (Km./h); R: Radio (m); W: Angulo de Deflexión (grados); L_T : Longitud total de la curva (m).

En Figura 2 se muestra un gráfico de las ecuaciones 2 y 3. Se aprecia que son similares en cuanto a los valores de velocidad, siendo las diferencias obtenidas inferiores al 1 %. Vale decir, inferiores a 2 Km./h.

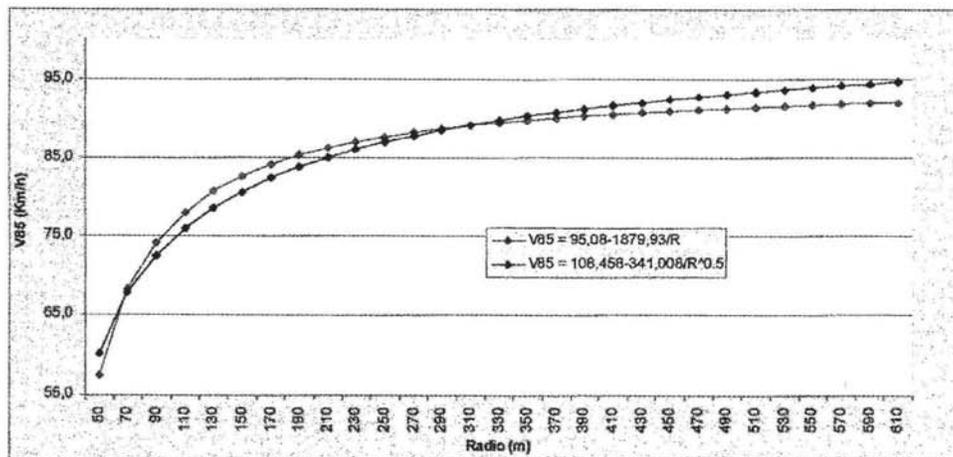


Figura 2: Relaciones Velocidad – Geometría Estimadas

Para radios inferiores a 200 m V85 disminuye bruscamente. Este radio es un valor mínimo asociado a una velocidad de diseño de aproximadamente 75 Km./h. Para ese mismo radio, V85 resultó ser de 85 Km./h. Esto muestra que para ese valor de radio mínimo, V85, excede en 10 Km./h la velocidad de diseño, encontrándose en umbral del valor límite de consistencia sugerido por Lamm *et al* (1999) para elementos aislados del alineamiento.

En Figura 3, se muestra la ecuación 2 obtenida por Sáez (2001) contrastada con la ecuación de Kanellaidis (1990). En Figura 4, la ecuación 3 contrastada con las de Irizarry y Krammes (1998), Voigt *et al* (1998), Pasetti y Fambro (1999) y Fitzpatrick *et al* (2000).

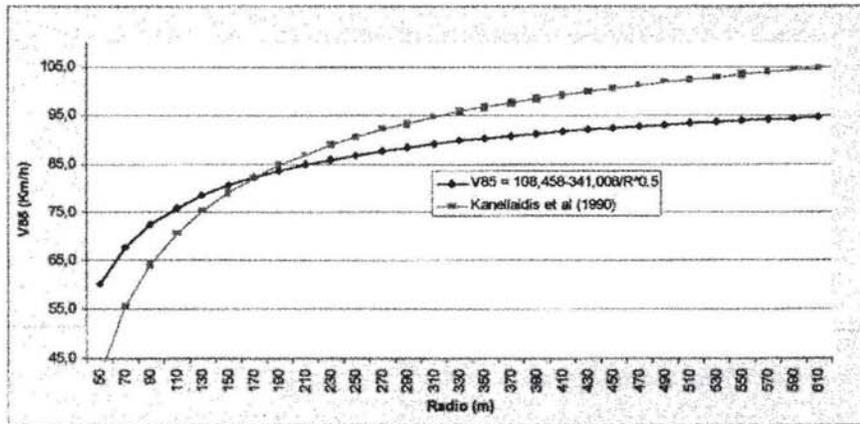


Figura 3: Ecuaciones Velocidad – Geometría para Especificación 5

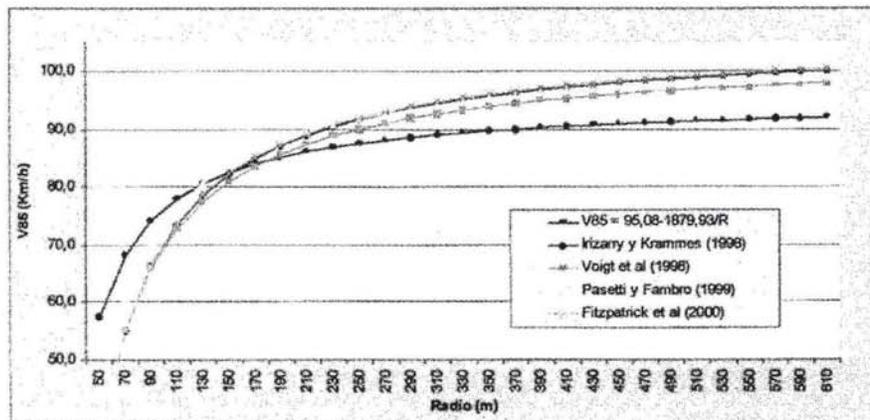


Figura 4: Ecuaciones Velocidad – Geometría de especificación 6

Al contrastar los modelos estimados según las especificaciones dadas en Tabla 4, con los resultados obtenidos en estudios similares en otros países, se aprecia que las diferencias porcentuales son inferiores al 5 %. Esto se debe fundamentalmente a que a pesar de la amplia diferencia en el número de observaciones empleadas (100 en los estudios analizados y 30 en el presente estudio), el número de sitios es similar (salvo el caso de Voigt *et al*), lo que estaría indicando que la modelación es más sensible al número de sitios que al número de observaciones por sitio.

4. CONCLUSIONES

En esta investigación se realizó un análisis de las relaciones entre velocidad y geometría para vías rurales bidireccionales de una pista por sentido. El objetivo de este trabajo, fue estimar relaciones del tipo indicado como punto de partida para la formulación teórica y práctica de perfiles de velocidad.

Los resultados obtenidos, permitieron verificar la existencia de una relación estadísticamente significativa entre la velocidad de percentil 85 y variables geométricas del alineamiento horizontal.

A partir de los resultados obtenidos se verificó que la distribución de velocidades se ajusta a una distribución de probabilidades normal, ratificando las observaciones realizadas por otros autores en diversas partes del mundo.

Se constató que para valores de velocidad de diseño inferiores a 100 Km/h, la velocidad de operación siempre excedió a la velocidad de diseño, aspecto a considerar dado que la mayoría de los caminos en Chile se han diseñado para velocidades inferiores. Es necesario sin embargo, analizar el caso correspondiente a $VD > 100$ Km/h, para lo cual es necesario analizar en terreno vías de mayor estándar.

El tamaño de la base de datos limitó el análisis de otros casos de interés, entre los cuales destaca: el análisis diferenciado por tipo de vehículo y puntos intermedios en curvas horizontales; en condiciones de pavimento húmedo, mala visibilidad por condiciones climáticas y nocturnas; el efecto de la presencia de espirales de transición, así como el efecto de la relación visibilidad disponible/desarrollo del conjunto espiral curva circular. Para realizar este tipo de análisis se requiere ampliar al base de datos aumentando el número de sitios de medición y de observaciones de velocidad por sitio.

Es necesario profundizar en el estudio de la relación entre la desviación estándar y la velocidad media. Esto permitirá precisar la estimación del tamaño muestral puesto que se dispondrá de valores característicos de velocidad asociados a las variaciones respecto de la media.

Aún cuando el peralte no resultó ser una variable estadísticamente significativa en la modelación realizada, es necesario analizar la relación existente entre velocidad, radio y peralte, a fin de estimar el efecto de la aceleración lateral en la elección de velocidad por parte del conductor.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Bennett, C. (1996). The HDM – 4 Road User Effects Model. **Briefing Paper for the ISOHDM Workshop on HDM – 4**. University of Birmingham, England.

Cardoso, J. (1998) Relations Between Accident Frequency and Speed Consistency in Portuguese Two - lane /Two - way Highways Links. **International Symposium on Highway Geometric Design Practices. Conference Proceedings**. 6 – 1, Boston, USA.

Cruzat, G. y Vargas, G (1990). Programa Computacional para evaluar proyectos de Transporte Caminero HDM – 3. Oficina de Planificación Nacional. Chile.

Fitzpatrick, K., L. Elefteriadou, D. Harwood, J. Collins, J. McFadden, I. Anderson, R. Krammes, N. Irizarry, K. Parma, K. Bauer, K. Passetti (2000) Speed Prediction for Two – Lane Rural Highways. **Publication FHWA – RD – 99 – 171**. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, U.S.A.

Irizarry, N. y R. Krammes (1998) Linear Regression Models for Estimating Operating Speeds of Passenger Vehicles on Rural Two-lane Highways. **Actas del X Congreso Panamericano de Transporte**. Artículo No 12, pp 651 a 658. Santander, España.

Islam, M y Senevirate, P (1994) Evaluation of Design Consistency of Two-Lane Rural Highways. **ITE Journal**, Vol 64 No 2, pp 28 a 31. Washington D.C., USA.

Lamm, R., B. Psarianos y T. Mailaender (1999) **Highway Design and Traffic Engineering Handbook**. 1st Edition. New York: McGraw Hill, USA.

McFadden, J. y L. Elefteriadou (1997) Formulation and Validation of Operating Speed – Based Design Consistency Models by Bootstrapping. **Transportation Research Record 1579**, pp 97 a 103. Washington D.C., USA.

McLean, J. (1981) Driver speed behaviour and rural road alignment design. **Traffic Engineering & Control**, 4, pp 208 a 211, London, UK.

McLean, J. (1998) Changes in Horizontal Alignment Design Standards in Australia and Canada. **International Symposium on Highway Geometric Design Practices. Conference Proceedings**, 2 – 1, Boston, USA.

MOP (1981). Instrucciones de Diseño. **Manual de Carreteras**, Vol 3, Santiago, Chile.

Passetti, K. y D. Fambro (1999) Operating Speed on Curves with and without Spiral Transitions. **Transportation Research Record 1658**, pp 9 a 16, Washington D.C., USA.

Kanellaidis, G. (1990) Driver's speed behaviour on rural road curves. **Traffic Engineering & Control**, 31(7), 414 – 415, London, UK.

Roess, R., W. McShane y E. Prassas (1998) **Traffic Engineering**. 2nd Edition. New Jersey: Prentice Hall, USA.

Sáez, J. (2001) Estudio de la Consistencia en Vías Rurales. Memoria de Título. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Voigt, A. y R. Krammes (1998) Operational and Safety Evaluation of Alternative Horizontal Curve Design Approaches on Rural Two – lane Highways. **International Symposium on Highway Geometric Design Practices. Conference Proceedings**, 11 – 1, Boston, USA.