

MODELACION DE ACELERACIONES DE VEHICULOS LIVIANOS EN CURVAS EN “S” PARA CAMINOS BIDIRECCIONALES

Cristian Henríquez, Universidad de Concepción crhenriquez@udec.cl

Tomás Echaveguren, Universidad de Concepción techaveg@udec.cl

Alejandro Tudela, Universidad de Concepción, atudela@udec.cl

RESUMEN

Los modelos que describen el perfil de velocidad en curvas horizontales inversas, habitualmente asumen aceleraciones y deceleraciones constantes. Sin embargo, la aceleración de operación en cada punto característico de una curva horizontal inversa es función de la geometría del alineamiento, antes y después de dicho punto, y de la velocidad de operación en el punto característico inmediatamente anterior. Por lo anterior, es necesario contar con modelos que permitan explicar estas relaciones y mejorar la estimación de los perfiles de velocidad. De este modo, en este trabajo se presentan un conjunto de modelos que permiten describir la aceleración de operación y estimar de manera más certera las transiciones de velocidad en curvas horizontales inversas. Los resultados mostraron que las aceleraciones/deceleraciones obedecen a una distribución Burr de cuatro parámetros, mostrando una importante asimetría que cambia en cada punto del trazado. Asimismo, se concluyó que el percentil 95 resulta ser un buen descriptor de la aceleración de operación, valor con el cual se calibraron 6 conjuntos de modelos que relacionan aceleraciones y deceleraciones con la geometría de curvas horizontales inversas.

Palabras clave: aceleración, vehículo liviano, curvas horizontales, caminos bidireccionales

SUMMARY

The speed profile models of horizontal reverse curves assume constant acceleration /deceleration values. However, operating acceleration point to point along reverse curves, are dependent of the geometry before and after each cross section and also depends of the operating speed. Therefore, to improve speed profiles, acceleration-geometry models are needed. This paper presents a set of models that explains acceleration-geometry relationships that permits to improve the speed profiles modeling in horizontal reverse curves. The results show that the acceleration / deceleration probability distribution functions follows a Burr distribution of four parameters with a relevant asymmetry that changes along the horizontal reverse curves. At the same time it was concluded that the 95th percentile of acceleration is suitable to describe the operating acceleration. This value was used to calibrate 6 sets of models that correlate accelerations and deceleration with the geometry of horizontal reverse curves.

Keywords: acceleration, light vehicle, horizontal curves, two-lane rural roads

INTRODUCCIÓN

Las curvas horizontales inversas (o en “S” (CS) constan de 2 curvas horizontales con curvatura inversa conectada por una tangente intermedia, incluyen además una tangente de entrada y una de salida que los conductores utilizan para identificar la primera curva y adaptar su velocidad, y para acelerar cuando salen de la CS, respectivamente. En este tipo de curvas la forma del perfil de velocidad de operación depende del radio y de la tangente de entrada. Los modelos disponibles solo relacionan la velocidad en la mitad de la curva con la geometría obteniendo así solo un punto del perfil de velocidad.

La transición de velocidad la estiman utilizando ecuaciones de la cinemática y considerando una aceleración (o deceleración) “de operación”, igual a 0.85 m/s^2 , que depende solo del percentil 85 de las velocidad de operación entre 2 puntos consecutivos. Con esto, la idealización de los perfiles de velocidad consideran un valor típico de deceleración, constante, que no necesariamente describe el proceso de cambio de velocidad en plenitud (García, 2014, Henríquez, 2015). Dicha idealización es válida en tanto la velocidad entre elementos consecutivos no afecte una a la otra, de manera que lograr que la covarianza entre velocidades sea nula.

Tomando en cuenta lo anterior, diversos autores han propuesto modelos de perfil de velocidad para CS, varios de esos modelos se discuten en Echaveguren *et al.* (2015). Investigaciones recientes han puesto en evidencia la necesidad de mejorar los perfiles de velocidad, de manera de incorporar en las transiciones de velocidad modelos de aceleraciones más realistas. Altamira *et al.* (2014) determinaron que existe una amplia variedad de valores de aceleración, que varían desde 0.2 hasta 1.2 m/s^2 , y deceleraciones que varían entre 0 y 1.5 m/s^2 . Concluyeron que valores constantes de aceleraciones y deceleraciones no son realistas puesto que dependen de los elementos geométricos de las curvas: pendientes longitudinales, radios de curvatura, longitud de tangentes de entrada, intermedia y de salida. De este modo valores constantes no son útiles para mejorar la precisión de los perfiles de velocidad, por lo cual es necesario desarrollar modelos aceleración – geometría.

La literatura muestra que existen muy pocos modelos de este tipo y que en su totalidad, describen cambios de velocidad en curvas horizontales aisladas, y que no existen modelos de este tipo para CS (Henríquez, 2015). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es discutir modelos aceleración-geometría calibrados para curvas horizontales de caminos bidireccionales, usando datos colectados con un *logger* GPS de 10 Hz , contribución que incorpora al estado del arte modelos inexistentes hasta la fecha.

LA ACELERACION EN CURVAS HORIZONTALES INVERSAS

Las curvas de inflexión en S

Una curva horizontal inversa o de inflexión en S se define como un alineamiento horizontal constituido por dos curvas inversas (una a la izquierda y la otra a la derecha, o viceversa) y tres tangentes, denominadas tangente de entrada, tangente intermedia y tangente de salida, respectivamente (Figura 1). En la Figura 1, PTe es el principio de la tangente de entrada, PC1, PC2, FC1 y FC2 son los principios y finales de las curvas 1 y 2, respectivamente y FTs es el final de la tangente de salida.

Lamm et al. (1988), basados en un criterio cinemático, proponen que existe una longitud de tangente intermedia que hace independiente a dos curvas. Díaz (2013) define que dos curvas sucesivas inversas constituyen una curva en S, o son compuestas, cuando la velocidad de la curva de entrada afecta a la velocidad en la tangente intermedia y en la curva de salida. Es decir, cuando existe una dependencia entre la operación de ambas curvas; en caso contrario son curvas aisladas.

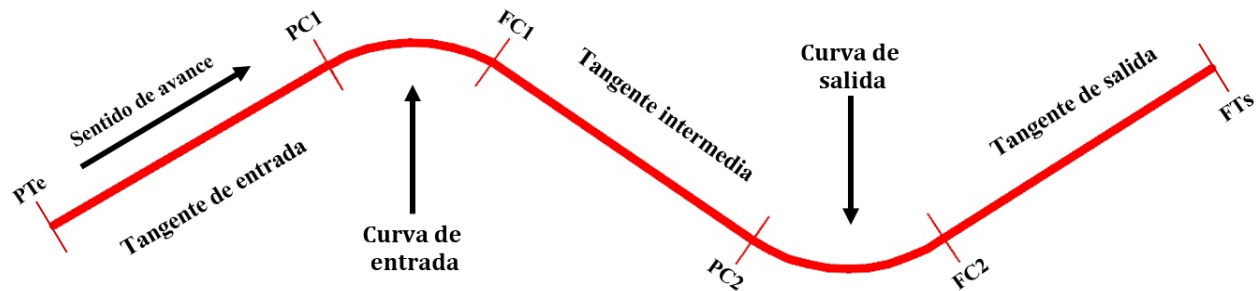


Figura 1. Curva de inflexión en S

El concepto de aceleración longitudinal

La aceleración/deceleración es una magnitud vectorial que indica la razón de cambio de la velocidad por unidad de tiempo. Su unidad en el sistema internacional es m/s^2 . Las aceleraciones y deceleraciones explican los cambios en la velocidad que experimenta un vehículo. Si la velocidad es constante, entonces la aceleración/deceleración es nula. En el caso particular del movimiento de un vehículo en terreno plano, el vector de aceleraciones posee dos componentes: la aceleración tangencial o longitudinal y la aceleración centrípeta o normal. La primera produce cambios en el módulo de la velocidad y expresa la rapidez con que ésta cambia, mientras que la segunda aparece sólo cuando el movimiento es curvilíneo y se relaciona con la comodidad de los conductores al desplazarse por el elemento geométrico. La aceleración normal en sí no afecta la velocidad de circulación de un vehículo.

Bajo el supuesto de aceleración constante, la cinemática entrega una expresión que permite calcular la aceleración media en función de la diferencia de velocidades y la distancia entre dos puntos. La expresión matemática que entrega la aceleración media entre los puntos 1 y 2 queda definida por la Ecuación 2.2.

$$a_{1-2} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{25,92 D} \quad (1)$$

Donde a_{1-2} es la aceleración longitudinal media (en m/s^2) entre los puntos 1 y 2, V_1 y V_2 son las velocidades (en km/h) en los puntos 1 y 2, respectivamente, y D (en m) es la distancia que separa ambos puntos. Diversos autores han usado la Ecuación 1 para obtener la aceleración longitudinal, utilizando la velocidad percentil 85. Sin embargo, su uso genera errores al asumir una aceleración constante entre dos puntos, por lo que los valores obtenidos no necesariamente representan la aceleración que realmente experimentan los conductores.

El uso de la Ecuación 1 ha sido cuestionado por diversos autores. Por ejemplo, Pérez et al. (2010) concluyen que la simple resta de velocidades subestima los valores de aceleración y deceleración. Park y Saccomanno (2006) postulan que no existe independencia de datos entre dos puntos cercanos y que realizar inferencias estadísticas con esos datos conduce a una falacia de pseudo-replicación. Bella (2008) demostró que el uso de la ecuación subestima los valores reales de aceleración y deceleración, resultados que son coincidentes con lo encontrado por Hirsh (1987) y Crisman et al. (2007), debido a que las distribuciones de velocidad son distintas en cada punto y el conductor de percentil 85 no tiene porqué ser el mismo en las dos ubicaciones, producto del sesgo generado por el método de medición.

Modelos de aceleración longitudinal

Los modelos se pueden clasificar en tres tipologías. Modelos basados en valores simples, modelos estratificados por radios de curvatura y modelos analíticos en función de la geometría horizontal. La Tabla 1 muestra una síntesis de los modelos disponibles en la literatura.

Tabla 1. Valores de aceleración obtenidos por distintos investigadores

Autor(es) - año	Lugar	a (m/s ²)	d (m/s ²)	Observaciones
Kockelke y Steinbrecher (1987)	Alemania	Sin resultados	< 1,00	Observaron valores de hasta 2,50 m/s ²
Lamm <i>et al.</i> (1988)	Estados Unidos	0,85	0,85	Encontraron valores entre 0,85 y 0,88 m/s ²
VSS (1991)	Suiza	0,80	0,80	Norma Suiza
Steierwald y Buck (1992)	Alemania	Sin resultados	0,23	Antes de señales de límite de velocidad
Steierwald y Buck (1992)	Alemania	Sin resultados	0,40 – 0,60	Antes de carteles con nombres de ciudades
Collins y Krammes (1996)	España	0,12 -0,53	0,35 – 1,19	Mínimo y máximo, respectivamente
Fitzpatrick y Collins (2000)	Estados Unidos	0,54	1,00	Observaron valores máximos de 1,77 y 1,44 (m/s ²) para a y d, respectivamente
Fitzpatrick y Collins (2000)	Estados Unidos	0,54	1,00	Observaron valores máximos de 1,77 y 1,44 (m/s ²) para a y d, respectivamente
Basualto (2003)	Chile	0,09 – 0,31	0,13 – 0,46	Mínimo y máximo, respectivamente
Echaveguren y Basualto (2003)	Chile	0,30	0,65	Midieron velocidad con pistola laser
Perco y Robba (2005)	Italia	Sin resultados	0,54	Deceleración media a través de la velocidad media
Perco y Robba (2005)	Italia	Sin resultados	0,71	Deceleración percentil 85 a través de la velocidad percentil 85
Figueroa y Tarko (2007)	Estados Unidos	0,49	0,73	Calculadas a partir de la velocidad percentil 85
Yang y Hassan (2008)	Canadá	0,20	0,20	Para velocidades de operación mayores o igual a 70 km/h
Dell' Acqua <i>et al.</i> (2008)	Italia	0,60	0,71	Midieron con pistola laser

Autor(es) - año	Lugar	a (m/s ²)	d (m/s ²)	Observaciones
Hu y Donnell (2010)	Estados Unidos	1,46	1,49	Medición continua de aceleraciones con GPS en conducción nocturna
Altamira <i>et al.</i> (2014)	Argentina	0,10 – 0,20	0,10 – 0,50	Utilizaron GPS Video VBox

En la Tabla 1 se observa que no existe coincidencia entre los distintos investigadores al definir valores representativos de aceleración/ entre los diversos estudios analizados. Esto se puede asociar, entre otros factores, a la metodología de trabajo, origen, recolección y procesamiento de los datos, características propias de la zona de estudio, de los vehículos y de los conductores. Los valores de aceleración y deceleración encontrados por Basualto (2003) y Echaveguren y Basualto (2003) muestran que el valor de 0,85 m/s² propuesto por Lamm (1988), y utilizado por autores como Krammes *et al.* (1995) y Jeffery y Krammes (2007), sobrestima sus resultados. La principal desventaja de trabajar con valores de aceleración constante radica en que se asume que éstos son únicos para todos los conductores y configuraciones geométricas, hipótesis que ha sido refutada por diversos investigadores.

Buscando mejorar la representatividad y aplicabilidad de los valores de aceleración constante, otros autores han definido aceleraciones en función del radio de la curva horizontal, los que se muestran en la Tabla 2. En dicha se observa que para radios mayores a 400 m, tanto la aceleración como la deceleración se aproximan a cero, pues el conductor no logra percibir la curva como tal sino más bien como una recta. Todo lo contrario ocurre para radios pequeños, donde se observan los mayores valores de aceleración y deceleración.

Tabla 2. Valores de aceleración en función del radio

Autores	Lugar	a (m/s ²)	d (m/s ²)	R (m)	Observaciones
Fitzpatrick <i>et al.</i> (2001)	Estados Unidos	0	-	> 875	En terreno observan valores máximos de aceleración y deceleración iguales a 1,44 y 1,77 m/s ² , respectivamente, por lo que el modelo subestima los valores reales.
		0,21	-	436 ≤ R ≤ 875	
		0,43	-	250 ≤ R ≤ 436	
		0,54	-	175 < R ≤ 250	
		-	0	> 436	
		-	1,00	< 175	
Cristman <i>et al.</i> (2004 y 2005)	Italia	0,54	1,00	≤ 178	Trabajaron con la velocidad percentil 85
		0,43	0,50	178 < R < 437	
		0,20	0,20	437 ≤ R ≤ 2187	

En cuanto a los modelos analíticos, la Tabla 3 muestra un resumen de aquellos disponibles en la literatura. En ellos se puede apreciar que la principal variable explicativa es el radio de curvatura. En la Tabla, d y a corresponden a la deceleración y aceleración respectivamente, en m/s².

Tabla 3. Modelos de aceleración/deceleración dependientes de la geometría horizontal

Autor(es)	Lugar	Modelo(s) (a y d en m/s ²)	R ²	Observaciones
Fitzpatrick <i>et al.</i> (2001)	Estados Unidos	$d = 0,6749 - \frac{295,14}{R}$, $175 \leq R < 436$	0,48	d = 0, R ≥ 436 d = 1, R < 175
Basualto (2003)	Chile	$a = \frac{52,524}{R}$, $250 \leq R \leq 436$	0,63	a = 0,21, R < 250 a = 0,06, R > 436 Modelo propio
		$d = -\frac{131,418}{R}$, $250 \leq R \leq 436$	0,82	d = -0,55, R < 250 d = -0,24, R > 436 Réplica de Fitzpatrick <i>et al.</i> (2001)
Bella (2008)	Italia	$a_{85} = -0,567 + \frac{74,47}{R} + 0,007 \cdot v_{85\text{máx}}$	0,59	Autores trabajaron en un simulador de conducción
		$d_{85} = -1,316 + \frac{148,28}{R} + 0,015 \cdot v_{85\text{máx}}$	0,54	
Pérez <i>et al.</i> (2010)	España	$d_{85} = 0,242186 + 0,00150693 \cdot \text{CCR}$ $\text{CCR} = \frac{ \alpha }{L}$	0,71	Modelos para transición recta-curva
		$d_{85} = 0,263571 + \frac{67,7999}{R}$	0,70	
Pérez <i>et al.</i> (2011)	España	$d_{85} = 0,313 + \frac{114,436}{R}$	0,66	Modelo para transición recta-curva
Psarianos y García (2011)	Europa	$a = 1,328 - 0,159 \cdot \ln(R)$	0,74	Aceleración después de la curva
		$d = 1,757 - 0,222 \cdot \ln(R)$	0,45	Deceleración antes de la curva

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Los datos utilizados para la modelación están conformados por dos clases: la primera clase corresponde a la geometría de diversas CS y la segunda a datos de posición, velocidad y aceleración medidas en CS. Ambas bases de datos fueron elaboradas previamente por Echaveguren *et al.* (2015) a partir de mediciones realizada en caminos bidireccionales de Chile. Los datos de geometría se obtuvieron a partir de imágenes satelitales y lecturas de *heading* obtenidas usando un GPS de 10 Hz. Incluyen radios de curvatura, ángulos de deflexión, longitud de curvas y longitud de tangentes.

La segunda base de datos está conformada por datos de posición, *heading*, velocidad y aceleraciones (las deceleraciones se registran como aceleraciones negativas). Ambas bases de datos corresponden a 23 CS. En el caso de la última base de datos, en cada curvas se dispone de 20 repeticiones (Echaveguren *et al.* 2015). Los datos se obtuvieron con un GPS de 10 Hz usando el procedimiento de medición implementado por Arellano et al (2014). Dicho GPS obtiene datos cada 0.1 s, con una precisión de 0.05 % en distancia, 0.2 km/h para velocidad, 0.1° para *heading*, 1 % para aceleraciones y 3 cm para posición (Racelogic, 2008).

La calibración de los modelos se desarrolló usando entre el 70 y 80 % de los datos, dependiendo de la cantidad de datos que fueron eliminados por constituir *outliers* (por ejemplo valores nulos por pérdida de señal satelital). Con el resto de valores se realizó la validación de los modelos. Se definieron en cada CS 9 secciones transversales alrededor de las cuales se agruparon datos individuales de aceleración de cada repetición y se realizó un test de bondad de ajuste para ajustar una distribución de probabilidades. Puesto que la distribución de probabilidades resultó no normal con asimetría y curtosis variables a lo largo de las secciones transversales, se aplicó la transformación Box-Cox a los datos de aceleración (y deceleración). Posteriormente se validaron los modelos aplicando el test χ^2 , se estimaron los índices MSE, MAE y MAPE, y se graficaron los valores predichos versus los modelados. A partir de este proceso se obtuvieron 21 modelos, uno para cada sección transversal de la CS.

MODELOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos en este trabajo se agrupan en 3 categorías: patrones de comportamiento de las aceleraciones en cada sección transversal característica, patrones gráfico de comportamiento de aceleraciones en función de la longitud en el interior de curvas en “S”, y modelos aceleración-geometría. A continuación se presentan los resultados para cada uno de estos análisis.

Se aplicaron test de bondad de ajuste a los valores de aceleración asociados a los siguientes puntos característicos de una curva en “S”: principio, mitad y fin de curva de las dos curvas, mitad de tangente intermedia, de entrada y de salida. Se determinó que en todas las curvas y en cada sección, las aceleraciones siguen una distribución Burr (también conocida como Singh-Maddala), que es asimétrica. También se determinó que la forma de la distribución, medida a través de su curtosis y asimetría, varía dependiendo de la sección. También con estas distribuciones se estimaron los percentiles 50, 60, 70, 80, 90, 95 y 99. Se determinó que en las 23 curvas analizadas y en todas las secciones, la aceleración obtenida a partir de las ecuaciones de la cinemática resultó inferior al percentil 50. Asimismo se determinó que sistemáticamente las distribuciones de frecuencia tendían a tener una simetría negativa, lo cual implica que los valores de aceleración entre percentiles consecutivos pueden implicar un gran cambio en el valor de aceleración. Esto es relevante para la construcción de modelos, que requieren de un valor de aceleración “de operación” asociado a un percentil determinado. Se propuso el percentil 95 de aceleraciones, dado que su valor resultó mucho más estable que el percentil 85, que es el habitualmente inferido desde el cambio en velocidad de percentil 85.

Se graficaron los valores de percentiles 95 en cada sección para diferentes rangos de velocidad de entrada a las curvas en “S”. (Figura 1). Los resultados muestra la dependencia de los valores de aceleración respecto de la geometría, dependencia que posteriormente se reflejó en los modelos calibrados.

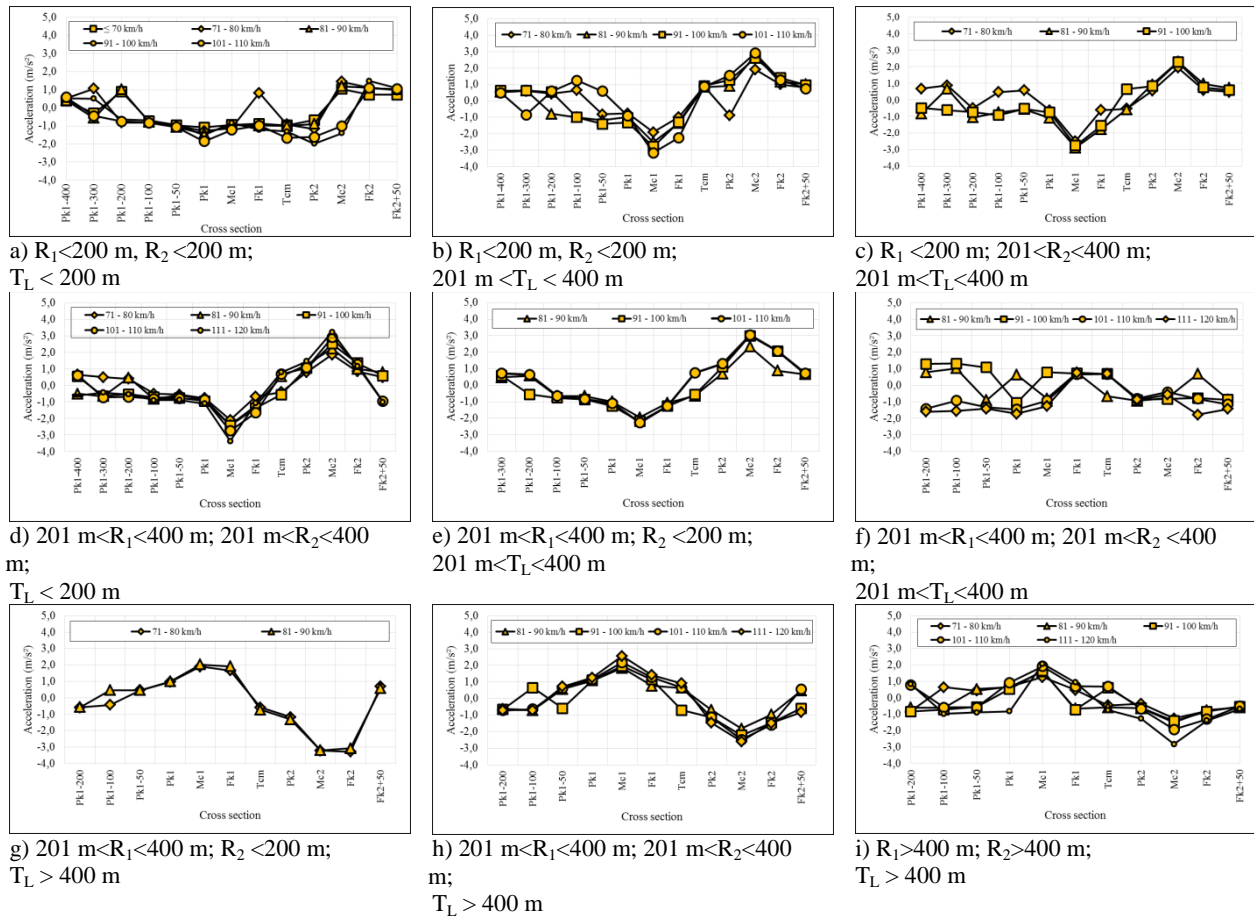


Figura 2. Perfiles de aceleración de percentile 95 por grupo de geometrías de curvas en “S”.

Los modelos obtenidos se muestran en la Tabla 4. Se puede apreciar que en su mayoría presentan coeficientes de correlación adecuados, y los valores t de los coeficientes son elevados, por lo cual los modelos resultan significativos. Estos modelos formalizan los patrones de comportamiento observados en la Figura 2.

Tabla 4. Modelos de aceleración calibrados

#	Especificación	Muestra	R ² ajust.
M2-1	Modelo lineal $Y = 0.961 - 0.006 V_{85a} + 0.0748 \sqrt{R_1} + 0.00055 L_{c1}$ (6.8) (-4.0) (14.7) (2.6)	Transformación Box-Cox $Y = 1 + \frac{(d_{95,2} + 4)^{4.081} - 1}{126.354}$	219 0.56
M2-2	Modelo lineal $Y = 1.347 - 0.0066 V_{85a} + 0.0041 R_1 + 0.00696 \omega_1$ (11.6) (-3.8) (19.0) (11.4)	Transformación Box-Cox $Y = 1 + \frac{(d_{95,2} + 4)^{2.565} - 1}{14.549}$	111 0.77
M2-3	Modelo lineal $Y = 4.208 - 0.1485 R_1$ (21.7) (-17.8)	Transformación Box-Cox $Y = 1 + \frac{(a_{95,2})^{0.0532} - 1}{0.07379}$	83 0.80
M3-1	Modelo lineal $Y = 2.718 - 414.143 \frac{1}{R_1}$ (36.8) (-19.0)	Transformación Box-Cox $Y = 1 + \frac{(a_{95,3})^{-0.501} - 1}{0.4365}$	162 0.69
M3-2	Modelo lineal $Y = -1.546 + 0.0117 R_1$ (-16.6) (28.6)	Transformación Box-Cox $Y = 1 + \frac{(a_{95,3})^{2.01} - 1}{1.61054}$	52 0.94
M3-3	Modelo lineal $Y = 2.6444 - 0.006 R_1 + 0.022 V_{85,3}$ (4.2) (-15.3) (3.9)	Transformación Box-Cox $Y = 1 + \frac{(a_{95,3})^{0.728} - 1}{0.6653}$	100 0.73
M4-1	$d_{95,4} = 1.00$	--	301 --

M4-2	$Y = 1.4442 + 0.00124 T_L - 0.0133 V_{85,3}$ (11.9) (13.1) (-8.9)	$Y = 1 + \frac{(a_{95,4})^{0.630} - 1}{0.72633}$	71	0.75
M4-3	$Y = -1.925 + 0.00169 T_L + 0.011466 V_{85,3}$ (-6.0) (9.0) (4.2)	$Y = 1 + \frac{(a_{95,4})^{0.570} - 1}{0.6416}$	77	0.63
M6-1	$Y = 4.220 - 0.01598 V_{85,5} - 197.824 \frac{1}{R_2}$ (27.3) (-11.0) (-16.0)	$Y = 1 + \frac{(d_{95,6} + 4)^{2.661} - 1}{18.1069}$	206	0.56
M6-2	$Y = 0.877 + 0.17935 \sqrt{R_2}$ (-3.1) (9.4)	$Y = 1 + \frac{(d_{95,6} + 4)^{4.484} - 1}{7884.0621}$	82	0.51
M6-3	$Y = 4.378 - 0.0149 V_{85,5} - 0.00035 T_L - 709.975 \frac{1}{R_2}$ (25.2) (-7.1) (-5.1) (-12.1)	$Y = 1 + \frac{(d_{95,6} + 4)^{4.914} - 1}{476.1505}$	123	0.67
M7-1	$Y = 7.354 - 0.0349 \omega_2 - 0.0351 V_{85,6}$ (16.2) (-14.6) (-8.0)	$Y = 1 + \frac{(d_{95,7} + 4)^{0.786} - 1}{0.6573}$	173	0.56
M7-2	$Y = -3.648 + 0.01576 \omega_2 + 0.0603 V_{85,6}$ (-10.5) (6.8) (15.4)	$Y = 1 + \frac{(a_{95,7})^{1.351} - 1}{1.6743}$	137	0.72
M7-3	$Y = -2.014 + 0.1335 \omega_2$ (-15.9) (23.8)	$Y = 1 + \frac{(a_{95,7})^{0.52} - 1}{0.588}$	49	0.92
M8-1	$Y = 4.764 - 0.0257 \omega_2 + 0.0143 V_{85,7}$ (18.7) (-16.8) (5.6)	$Y = 1 + \frac{(d_{95,8} + 4)^{2.162} - 1}{7.0210}$	176	0.62
M8-2	$Y = -2.784 + 180.636 \frac{1}{R_2} + 0.0383 V_{85,7}$ (-7.3) (5.9) (10.0)	$Y = 1 + \frac{(a_{95,8})^{-0.35} - 1}{0.3214}$	131	0.44
M8-3	$Y = 0.728 - 0.00181 R_2 + 0.01057 V_{85,7}$ (3.4) (-9.3) (5.4)	$Y = 1 + \frac{(a_{95,8})^{-0.615} - 1}{1.399}$	37	0.74

CONCLUSIONES

La mayoría de los trabajos presentes en el estado del arte proponen un único valor de aceleración para describir el comportamiento de los conductores en la entidad geométrica; otros estudios entregan valores estratificados en función del radio de la curva y, por último, algunos utilizan otras variables geométricas para definir la aceleración en determinados puntos del alineamiento. No se identificaron modelos asociados a curvas de inflexión en “S”, sino que más bien para curvas horizontales aisladas. De este modo, los modelos que se presentaron en este trabajo contribuyen al estado del arte, teniendo en cuenta que las curvas de inflexión en “S” comúnmente se analizan por separado sin reparar en la influencia conjunta que ejercen dicha geometría sobre el perfil de velocidad y de aceleración como un todo.

Las ecuaciones de la cinemática para estimar aceleraciones subestiman los valores de aceleración de operación, siendo incluso inferiores al percentil 50 de aceleraciones, por lo cual su uso para elaborar perfiles de velocidad no es aconsejable. Por el contrario, es recomendable utilizar modelos que relacionen las aceleraciones /deceleraciones con la geometría.

El análisis estadístico de las aceleraciones mostró que la distribución de probabilidades ajustada es no-normal, sino que sigue una distribución Burr de 4 parámetros y que su kurtosis y asimetría varía sección a sección en las curvas en “S”, tendiendo las distribuciones a ser más planas y a tener asimetría negativa. A partir de esto, el mejor descriptor de la aceleración de operación resultó ser el percentil 95 de la distribución de frecuencia, valor que se usó para calibrar los modelos obtenidos en este trabajo.

Los modelos aceleración-geometría, muestra que existe una relación de dependencia de la aceleración respecto de los radios de curvatura, ángulos de deflexión, longitud de tangentes, y velocidad de entrada a la curva en “S”. Por tanto, no es válido usar valores constantes de aceleración o estratificados solamente por radio de curvatura, para construir los perfiles de velocidad.

REFERENCIAS

Altamira, A.; García, Y.; Echaveguren, T.; Marcet, J. (2014). Acceleration and deceleration patterns on horizontal curves and their tangents on two-lane rural roads [CD-ROM], **Proc. of the 93rd Annual Meeting Transportation Research Board**. Ed. by Transportation Research Board 12-16 January, 2014, Washington, D.C., Estados Unidos.

Arellano, D.; Echaveguren, T.; Vargas-Tejeda, S. (2014). A study of truck speed profiles in short upgrades. **Proceedings of the ICE – Transport** 168. DOI: 10.1680/tran.13.00012.

Basualto, J. (2003) **Incorporación de las aceleraciones en el análisis de consistencia del alineamiento horizontal**. Memoria de Título Ingeniero Civil. Universidad de Concepción, Concepción.

Bella, F. (2008) **Assumptions of operating speed-profile models on deceleration and acceleration rates: verification in the driving simulator**. 87th Annual Meeting Transportation Research Board. Washington, D.C. Estados Unidos.

Collins, K. M., y R. A. Krammes (1996) Preliminary validation of a speed-profile model for design consistency evaluation. **Transportation Research Record**. 1523. 11-21.

Crisman B., A. Marchionna, P. Perco, A. Robba y R. Roberti (2005) **Operating speed prediction model for two-lane rural roads**. 3rd. International Symposium on Highway Geometric Design. Chicago. Estados Unidos. Junio.

Crisman, B., A. Marchionna, P. Perco y R. Roberti (2004) **Operating speed prediction model for two-lane rural roads**. II° International Congress S.I.I.V. 27-29. Florencia. Italia.

Crisman, B., P. Perco, A. Robba y R. Roberti (2007) Deceleration model for two-lane rural roads. **Advanced in Transportation Studies**, XI. 19-32.

Dell'Acqua, G., F. Russo, T. Esposito y R. Lamberti (2008) **Accelerazione e decelerazione in curva: indagine sperimentale**. 17° Convegno Nazionale di Trasporti. Enna. Italia.

Díaz W., A. (2013) **Modelación de Perfiles de Velocidad de Operación en Alineamientos Horizontales Compuestos**. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Universidad de Concepción. Concepción.

Echaveguren, T. y M. Basualto (2003). **El análisis de aceleraciones en la consistencia de elementos simples de alineamientos horizontales**. XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago.

Echaveguren, T; Díaz, A.; Vargas-Tejeda, S. (2015). Operating speed model for horizontal reverse curves. **Proceedings of the ICE – Transport** (en Prensa).

Figuroa, A. y A. Tarko (2007) Speed changes in the vicinity of horizontal curves on two-lane rural roads. **Journal of Transportation Engineering**, 133(4). 215 – 222.

García, Y (2014). **Aceleraciones y desaceleraciones de vehículos livianos en caminos de montaña**. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de San Juan. Argentina.

Echaveguren, T. y M. Basualto (2003). **El análisis de aceleraciones en la consistencia de elementos simples de alineamientos horizontales**. XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago.

Fitzpatrick, K., L. Elefteriadou, D. Harwood, J. Collins, J. McFadden, I. Anderson, R. Krammes, N. Irizarry, K. Parma, K. Bauer y K. Passetti (2001) **Speed Prediction for two-lane rural highways**. Publicación Federal Highway Administration. 99 – 171. Washington, D. C. Estados Unidos.

Fitzpatrick, K. y J. M. Collins (2000) Speed-profile model for two-lane rural highways. **Transportation Research Record**. 1737. 42–49.

Henríquez, C (2015). **Modelación de aceleraciones longitudinales medidas con GPS en caminos rurales**. Tesis de Magister en Ciencias. Universidad de Concepción. Chile.

Hirsh, M. (1987) Probabilistic approach to consistency in geometric design. **Journal of Transportation Engineering** 113 (3). 268–276.

Hu, W. y E. Donnell (2010) Models of acceleration and deceleration rates on a complex two-lane rural highway: results from a nighttime driving experiment. **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, 13(6). 397-408.

Jeffery, L. y R. Krammes (2007) Speed-profile model for a design-consistency evaluation procedure in the United States. **Transportation Research Record**. 1701. 76-85.

Lamm, R., E. Choueiri y J. Hayward (1988) Tangent as an independent design element. **Transportation Research Record**, 1195. 123 – 131.

Lamm, R.; Beck, A.; Ruscher, T.; Mailaneder, T.; Cafiso, S.; La Cava, G. (2007). **How to Make Two-lane Rural Roads Safer: Scientific Background and Guide for Practical Application**. 1a Edición, WIT Press. Southampton.

Park, Y. J. y F. Saccomanno (2006) Evaluating speed consistency between successive elements of a two-lane rural highway. **Transportation Research Part A: Policy & Practice**. 40(5). 375-385.

Perco, P. y A. Robba (2005) **Evaluation of the deceleration rate for the operating speed-profile model**. III International Congress S.I.I.V. Florencia. Italia.

Pérez Zuriaga, A.M., A. García y F. J. Torregrosa (2011) Study of tangent to curve transition on two-lane rural roads with continuous speed profiles. 90th Annual Meeting Transportation Research Board.

Pérez, A., A. García, F. Torregrosa y P. D'Attoma (2010) Modeling operating speed and deceleration on two-lane rural roads with global positioning system data. **Transportation Research Record**, 2171. 11-20.

Psarianos B. y A. García (2011) Speed models in Europe. Transportation Research Circular E-C151 Modeling Operating Speed. Synthesis Report, Transportation Research Board. Washington, D. C. Estados Unidos.

Racelogic (2008). **VBOX Mini User Guide**. Reino Unido.

Steierwald, G., y M. Buck (1992) Speed behaviour on two-lane rural roads with regard to design, operational and traffic related conditions. **Research Road Construction and Traffic Technique. 621**. Ministry of Transportation. Alemania.

VSS. (1991) **Highway Design, Fundamentals, Speed as a Design Element. Publication Swiss Norm SN 640 080 a/b**. Swiss Association of Road Specialist, Zurich, Suiza.

Yang, L. y Y. Hassan. (2008) Driver speed and acceleration behavior on Canadian roads. **87th Annual Meeting Transportation Research Board**. 13 – 17. Washington, D.C. Estados Unidos. Enero