

# Perfiles de Velocidad de Operación en Curvas Horizontales Aisladas

Tomás Echaveguren  
Universidad de Concepción  
techaveg@udec.cl

Álvaro Díaz  
Universidad de Concepción  
adiazworner@gmail.com

## RESUMEN

Los perfiles de velocidad permiten describir la velocidad de una carretera a lo largo de su trazado. Para su elaboración requieren modelos que relacionen la velocidad con la geometría. Generalmente, estos modelos asumen que la velocidad de operación es constante en las curvas horizontales y no consideran el efecto de la tangente de entrada en la velocidad ni de la variabilidad de la velocidad al interior de la curva. Este trabajo propone nuevos modelos de perfiles de velocidad basados en mediciones de velocidad obtenidas con un GPS. Los modelos muestran que el ajuste de velocidad se produce en la tangente de entrada y no en la mitad de la curva como lo expresan los modelos tradicionales, debido a que el desarrollo de las curvas no permite al conductor realizar ajustes a la velocidad.

*Palabras clave:* Velocidad de operación, perfil de velocidad, curvas horizontales.

## ABSTRACT

The speed profile describes the speed along the highways. To develop it, models that correlate the speed with the road geometry are needed. Those models consider that operating speed is constant along the horizontal curves. Also, the models do not consider the effect of the entrance tangent on speed, neither the speed variability into the curve. This paper proposes new speed profile models based on speed measurements obtained with a GPS device. The models show that the speed negotiation occurs at the entrance tangent and not in the middle point of the curves as shows the traditional models, because the curve length do not permits to drivers adjust his/her speed.

*Keywords:* Operating speed, speed profile, single horizontal curves.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los perfiles de velocidad representan la variación de la velocidad de diseño o de operación a lo largo de la geometría de las carreteras. Es una de los datos de entrada más relevantes para los análisis de seguridad y, en particular, para el análisis de consistencia del diseño geométrico. Para construir estos perfiles de velocidad se requiere contar con modelos que permitan correlacionar la velocidad de operación con la geometría de la carretera.

La literatura es profusa en modelos que describen la velocidad de operación con curvas horizontales aisladas. Desde 1954 hasta el año 2010, existen alrededor de 110 modelos en diversas publicaciones científicas. En su mayoría, estos modelos correlacionan la velocidad de operación medida en la mitad de la curva con el radio curvatura, peralte o desarrollo de las curvas. Otros modelos incorporan la velocidad de aproximación como variable explicativa y otros utilizan elementos geométricos tales como deflexiones, ancho de pista, peralte y pendiente longitudinal (Echaveguren, 2010).

La mayoría de estos modelos asumen que la velocidad en el interior de una curva horizontal es constante y que depende esencialmente del radio de curvatura, por lo cual es suficiente correlacionar la geometría de la curva con la velocidad de operación medida en la mitad de la curva. Estos supuestos se han adoptado desde la experiencia en el uso del modelo de masa puntual para el diseño geométrico de curvas horizontales aisladas. Sin embargo, existe evidencia empírica que muestra que los conductores ajustan su velocidad al comienzo de la tangente de entrada y que en el interior de la curva la adaptan en función de la curvatura pero en mayor medida en función de la velocidad de ingreso a la curva.

Bavkov (1968) describe en términos teóricos este proceso, proponiendo un perfil de velocidad que permitía estudiar el cambio de velocidad al ingresar a la curva como una medida de seguridad. Echaveguren y Basualto (2003) y Figueroa y Tarko (2007) comprueban empíricamente que dentro de la curva el conductor decelera o acelera ajustándose a la trayectoria según sus necesidades.

Campbell et al (2008) describen con más detalle el fenómeno de adaptación de la velocidad descrito por Bavkov (1968). Dividen las curvas horizontales en 4 sectores: la aproximación, la zona de descubrimiento, la entrada a la curva y la salida a la curva. Las primeras dos partes constituyen la tangente de entrada, que es donde los conductores realizan el proceso de adaptación de la velocidad. La longitud de esta tangente de entrada tiene relación con la distancia requerida por los conductores para adaptar la velocidad. Campbell et al (2008) proponen una longitud entre 75 y 100 m.

McFadden y Elefedarou (2000) proponen 200 m y Echaveguren y Basualto(2003) usaron aproximadamente 200 m. Todas estas distancias medidas desde el principio de la espiral de entrada a la curva.

En base a la evidencia anterior, el objetivo de este trabajo es analizar perfiles de velocidad en curvas horizontales aisladas en base a datos obtenidos con GPS, incluyendo el efecto de variación de velocidad desde la tangente de entrada hasta la salida de la curva. En el trabajo se incluye una discusión de los modelos de velocidad de operación que incorporan la variabilidad en la velocidad. Luego se presenta resumidamente el trabajo de recolección de datos en terreno su procesamiento y la conformación de la base de datos usada para obtener los modelos. Luego se presentan los modelos obtenidos y posteriormente se discuten los resultados considerando diversos escenarios de predicción asociados a combinaciones de velocidad de entrada y radio de curvatura.

## 2. MODELOS DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN EN CURVAS HORIZONTALES

### 2.1 Las Curvas Horizontales Aisladas

Las curvas horizontales aisladas corresponden a arcos curvos que empalman dos tangentes suficientemente distanciadas de otras curvas. Geométricamente, están constituidas por una combinación de las entidades geométricas espiral–arco circular–espiral, cuya especificación depende del ángulo de deflexión de los ejes de replanteo y de la velocidad de diseño.

Los requerimientos de diseño en cuanto a parámetros de las espirales, radio del arco circular, desarrollo y peralte, se encuentran en las normativas de diseño. En Chile, MOP (1994) establece criterios y restricciones de diseño basadas en la velocidad de diseño y partir del año 2000, criterios basados en el equilibrio entre la oferta y la demanda de fricción lateral (MOP, 2012).

Operativamente, y siguiendo los postulados de Bavkov (1968) y Campbell et al (2008), las curvas horizontales aisladas ocupan un espacio del trazado más amplio que el geométrico, al incluir una tangente de entrada de longitud suficiente como para que el conductor identifique la curvatura del trazado y seleccione adecuadamente la velocidad a la cual ingresará a la curva. En consecuencia, una curva horizontal aislada consiste en la secuencia de elementos geométricos tangente–espiral–arco circular–espiral–tangente. Por tanto, la tangente de entrada constituye un elemento adicional del diseño de las curvas horizontales (Lamm et al, 1988).

### 2.2 Comportamiento Observado de la Velocidad de Operación en Curvas Horizontales

La variabilidad de la velocidad de operación en el interior de las curvas ha sido descrita por diversos estudios en base a evidencia empírica. Echaveguren y Basualto (2003) construyeron perfiles de velocidad empíricos en curvas aisladas considerando la velocidad en las tangentes de entrada dentro de la curva y en la tangente de salida. Obtuvieron la velocidad mediante pistola laser, por lo cual el perfil es el resultado de diversas mediciones puntuales.

La Figura 1 muestra el perfil de velocidad obtenido en dicho estudio. En ella se aprecia que la reducción de velocidad en la tangente de entrada ((PC-X) es más pronunciada en la medida que disminuye el radio de curvatura.

Asimismo, se aprecia que en general el menor valor de velocidad de operación se alcanza aproximadamente en la mitad del arco circular (MC) y tiende a estabilizarse en la salida de la curva.

Un estudio reciente realizado por Austroads (2013) muestra resultados similares a los obtenidos por Echaveguren y Basualto (2003). La Figura 2 muestra uno de los ejemplos de perfiles de velocidad obtenidos por los autores del trabajo.

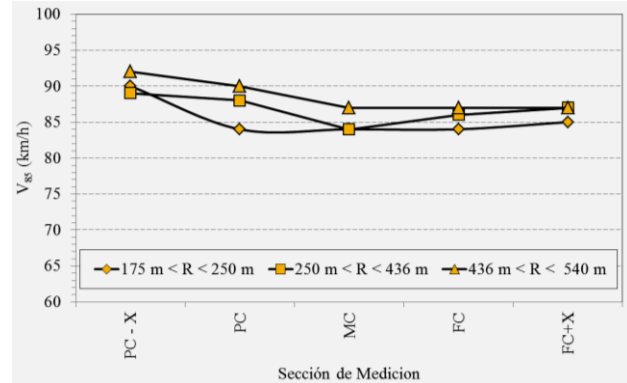


FIGURA 1: Perfil de Velocidad

Obtenido por Echaveguren y Basualto (2003)

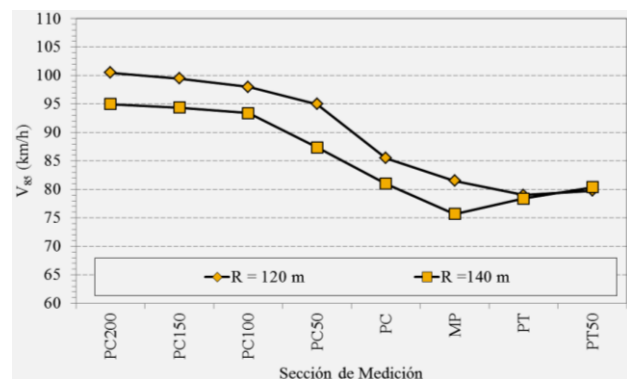


FIGURA 2: Perfiles de Velocidad en Curvas Horizontales

Obtenidos por Austroads (2013)

Con la tecnología GPS este tipo de comportamiento se puede analizar de manera más sencilla, puesto que la densidad de datos de velocidad que se puede obtener es muy superior a aquella que se obtiene mediante métodos puntuales de medición de velocidad. Dependiendo de la frecuencia del dispositivo GPS (1, 5, 10 o 20 Hz) se, pueden obtener entre 30 y 2400 puntos de datos/km a velocidades entre 50 y 120 km/h. Cafiso et al (2005), Memon (2008), y Cafiso y Cerni (2012) ha explorado el uso de GPS para desarrollar modelos de velocidad de operación y geometría siendo su utilización aún incipiente.

### 2.3 Modelos de Velocidad de Operación que Consideran Efecto de la Tangente de Entrada

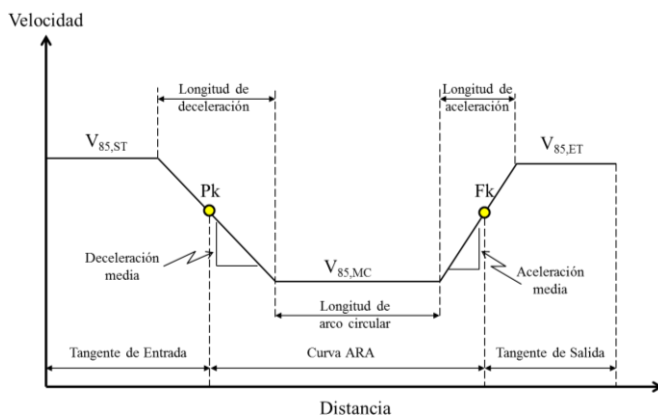
Dentro de la categoría de modelos de velocidad de operación–geometría para curvas horizontales aisladas, son escasos aquellos que consideran directa o indirectamente el efecto de la tangente de entrada. Los modelos de McLean (1981) (Ec. 1) y Simpson y Kerman (1982) (Ec. 2) consideran además del radio de curvatura (R, en m) la velocidad en la tangente de aproximación ( $V_a$  en km/h), con lo cual incluyen el efecto de la velocidad en la tangente de entrada, pero no los cambios de velocidad en el interior de las curvas horizontales.

$$V_{85} = a_0 - \frac{a_1}{R} \quad ; \quad a_0 = 0,91V_a + 4,61 \quad ; \quad a_1 = 0,0006V_a^{3,26} \quad (1)$$

$$V_{85} = V_a \left\{ 1 - \frac{V_a^2}{400R} \right\} \quad (2)$$

Los modelos de la Ec. 1 y 2 estiman la velocidad de operación en la mitad de la curva y el efecto de la velocidad deducida en la tangente de aproximación mediante métodos cinemáticos, que explican la variación de velocidad en tangentes largas. Este enfoque de modelación es consistente con el modelo conceptual de Campbell et al (2008) en el sentido que logra explicar la variación de velocidad antes de ingresar a la curva horizontal pero no en su interior.

Figuroa y Tarko (2007) plantean un enfoque conceptual similar. Desarrollaron un modelo de predicción de velocidad que incluye la variabilidad de la velocidad de operación en el interior de la curva, como se muestra en la Figura 3.



**FIGURA 3: Modelo Conceptual de Figuroa y Tarko (2007)**  
para explicar la Velocidad de Operación

El modelo si bien explica de manera adecuada el perfil teórico de velocidad en una curva horizontal aislada, presupone que la aceleración y la deceleración son constantes, lo cual no necesariamente es correcto. Para verificar la hipótesis del modelo de Figuroa y Tarko (2007) es necesario contar con una adecuada densidad de datos para obtener una explicación representativa de la velocidad y de la aceleración en las zonas de transición de velocidad.

### 3. MEDICIÓN EN TERRENO

#### 3.1 Selección de Tramos de Medición

Los tramos de medición, o unidades de muestreo, corresponden a curvas horizontales aisladas, con longitudes de tangentes suficientemente extensas como para aislar el posible efecto de curvas horizontales adyacentes.

La selección de tramos de medición se realizó en dos etapas: selección en gabinete y validación en terreno. En ambas etapas se definieron criterios de selección destinados a aislar efectos no deseados sobre las mediciones de velocidad.

En la etapa de gabinete se identificaron 67 tramos de muestreo candidatos, usando los siguientes criterios:

- Localización: Se seleccionaron grupos de tramos de medición cercanos a campamentos base a fin de minimizar los costos por traslado y facilitar la logística del trabajo de terreno.
- Tipo de superficie: se consideraron solo tramos pavimentados. La información se obtuvo de inventario vial que mantiene la Dirección de Vialidad de Chile.
- Tráfico: volumen de tránsito inferior a 5.000 veh/día-año, de acuerdo a Echaveguren y Sáez (2001).
- Accesos: ausencia de accesos laterales.
- Área adyacente: se consideraron sólo tramos fuera de límites urbanos y sin presencia de viviendas, escuelas y alejadas de zonas con un potencial alto de flujo de vehículos agrícolas, no motorizados o peatones.
- Geometría en extremos: tramos con tangentes de entrada y de salida superior a 400 m para permitir maniobrabilidad.

Cada uno de los tramos candidatos se inspeccionaron en terreno, teniendo en cuenta los siguientes criterios de selección:

- Estado del pavimento: se consideraron sólo secciones con pavimentos en buen estado.
- Operatividad: se consideran aquellos caminos sin trabajos en la vía o en sus costados.
- Costados del camino: se consideran sólo aquellos caminos sin obstáculos que comprometan la visibilidad (zonas boscosas o taludes muy cercanos a la berma) o favorezcan la interrupción de tránsito (por ejemplo, paraderos de transporte público rural).
- Interferencias: no se consideran aquellos tramos en que existían interferencias locales sobre la señal del dispositivo GPS, tales como zonas de bosques densos o bien tendidos eléctricos de alta tensión, transformadores o subestaciones eléctricas.
- Seguridad en el área de medición: se consideraron aquellos tramos en donde era posible realizar maniobras de giro y/o con espacios para la detención ante casos fortuitos.

Después de este proceso de selección se obtuvo un total de 47 tramos de muestreo.

#### 3.2 Medición de Terreno

Las mediciones se realizaron mediante un logger GPS de 10 Hz, acoplado al parabrisas de un vehículo liviano. La antena del dispositivo GPS se monta en el techo del vehículo sobre el eje longitudinal central. El logger GPS permite medir la velocidad, aceleración, posición, radio de curvatura y azimut y almacenarlas para su posterior procesamiento. El equipo captura datos cada 0,1 s con una precisión de 0,2 km/h y de 0,05 % en distancia. El equipo puede además triangular en movimiento hasta 8 satélites, lo cual le permite obtener una señal estable durante la recolección de datos (Racelogic, 2008).

Previo a la ejecución de mediciones en cada tramo de medición se verificaron las condiciones climáticas del lugar. Sólo se realizaron mediciones con buen tiempo y pavimento seco. Asimismo, se verificó que no hubiera actividades de mantenimiento y/o mejoramiento en los tramos a medir.

En terreno se identificaron los tramos y se demarcaron puntos de control al inicio y al término, asignándosele al primero el kilometraje relativo 0+000. La distancia media seleccionada entre el punto de control de inicio y el inicio de la curva fue de aproximadamente 1 km. Esto con el fin de lograr estabilizar la velocidad de medición antes de ingresar a la curva.

Las mediciones se realizaron aplicando la técnica de seguimiento vehicular, en la cual el vehículo de medición actúa como vehículo seguidor, tratando de replicar la velocidad y trayectoria del vehículo que es medido (vehículo líder) y manteniendo aproximadamente constante la distancia entre ambos. El proceso de medición se ejecutó de la siguiente manera:

- Inicio de mediciones: con el vehículo detenido, el equipo alineado y funcionando se activa el logger GPS a la espera del paso de un vehículo. Cuando esto ocurre, comienza el seguimiento vehicular, para lo cual se utiliza un conductor entrenado cuya función es alcanzar al vehículo perseguido imitando su trayectoria y manteniendo una distancia constante cercana a los 50 m del vehículo líder.
- Mediciones válidas: se siguió al vehículo por toda la unidad de muestreo hasta el segundo punto de control, el vehículo disminuye la velocidad hasta detenerse y se retira la tarjeta de memoria, quedando registrada la información.
- Mediciones fallidas: si el vehículo perseguido se enfrenta a condiciones externas que lo hacen modificar su velocidad o su trayectoria, la medición es descartada.
- Repeticiones: se vuelve al punto de partida para proceder a repetir el procedimiento, realizando entre 20 y 30 mediciones.

En las curvas seleccionadas, los radios de curvatura obtenidos variaron entre 190 m y 687 m, correspondiente a una velocidad de diseño entre 70 y 120 km/h aproximadamente. El detalle de las velocidades de operación en TE, PK, MC y FK se encuentran en el Anexo 1.

### 3.3 Procesamiento de Datos de Azimut y Velocidad

Los datos de azimut y velocidad se obtuvieron directamente con el logger GPS. En cada repetición se construyó el perfil de azimut a lo largo de la curva. A partir de este perfil, se construyó el diagrama de curvatura cuyos cambios de pendiente determinan los puntos característicos PK (principio de curva) y FK (fin de curva). Una vez identificados estos puntos se estimó el desarrollo completo de la curva, incluyendo las clotoides de entrada y salida, para posteriormente identificar el punto medio de la curva (MC). La tangente de entrada (TE) quedó definida por el punto ubicado a 200 m antes de PK.

Los datos de velocidad se procesaron siguiendo dos pasos: filtrado de las señales de velocidad y suavización de datos de velocidad. El filtrado de las señales de velocidad permite resolver al mismo tiempo la detección de datos anómalos, recuperar *dropouts* (datos perdidos) por caída de satélites y acoplar los registros de posición, trayectoria y velocidad obtenidos con el GPS. Después de filtrar y corregir los datos se realizó la suavización, con el fin de reducir el ruido y simplificar así la interpretación de los perfiles de velocidad. Para ello se utilizó el suavizador Loess (suavización de datos ponderados localmente) el cual fue testeado en trabajo previos desarrollados por los autores de este trabajo.

Los datos de velocidad se organizaron en una base de datos de acuerdo al número de repeticiones y a las balizas virtuales. Luego estos datos se asociaron a los datos geométricos para identificar posteriormente los valores de velocidad característicos asociados a cada entidad geométrica: tangente de entrada (TE), principio de curva (PK), mitad de curva (MC) y fin de curva (FK).

Luego de depurar los 47 tramos de medición y asociarles la geometría, se seleccionaron 34 curvas horizontales para comparar los modelos de análisis de consistencia (ver Anexo 1).

## 4. MODELOS DE VELOCIDAD CALIBRADOS

### 4.1 Criterios de Modelación

En una primera etapa se conceptualizó el tipo de modelo a calibrar asumiendo los siguientes principios y criterios de modelación:

- Las secciones geométricas características corresponden a la tangente de entrada (TE), el principio de la espiral de entrada (PK), la mitad de la curva (MC) y el término de la espiral de salida (FK). Por tanto, el perfil de velocidad obtenido es válido entre la tangente de entrada y el fin de la curva horizontal.
- Con excepción de la velocidad en la tangente de entrada, la velocidad modelada en cada punto característico depende de la velocidad en el punto anterior y de la geometría percibida en el punto posterior. De esta manera, en cada punto los modelos consideran la memoria (o carga mental) y la expectativa (previsión de la geometría). Por lo tanto, la velocidad en cada punto está correlacionada con los puntos vecinos.
- En cada punto característico, la distribución de frecuencia de las velocidades se distribuye normal y en los 20 puntos vecinos anteriores y posteriores al punto característico, se distribuye uniforme. Esto permite condensar los datos de velocidad por cada medición continua y entre vehículos, para obtener un tamaño muestral por punto superior a los 800 datos. En estricto rigor alrededor de cada punto característico la distribución de frecuencia de velocidades es bivariada: en términos espaciales se distribuye uniforme y en términos transversales (entre pasadas) se distribuye normal. Por simplicidad, se eligió condensar los datos espaciales y por pasada para obtener una muestra de la población de datos de velocidad alrededor de cada punto característico.
- La selección de modelos se realizó considerando el error total y el contenido de información de cada especificación funcional en los puntos característicos. Por un lado, se especificó un error máximo ( $S$ ) de 5 km/h, teniendo en cuenta que los umbrales de consistencia basados en las diferencias de velocidad varían de 10 en 10 km/h. Por otro lado, una vez seleccionados los modelos de acuerdo al criterio de error máximo se compararon en base al contenido de información estimado con el criterio de información de Akaike(AIC).

### 4.2 Modelos Obtenidos

Para modelar se utilizó el análisis de regresión no lineal implementado en el software TIBCO Spotfire S+® 8.1. Se probaron aproximadamente 30 especificaciones funcionales y se priorizaron de acuerdo a los criterios de selección antes mencionados.

Los modelos de velocidad de operación finalmente obtenidos en PK, MC y FK se muestran en las Ecs. 3, 4, y 5 respectivamente. Los 3 modelos se encuentran parametrizados respecto de la velocidad en TE, el cual es un dato de entrada adicional a la geometría de la curva.

$$V_{85,PK} = 51.3 + 0.524 V_{85,TE} - \frac{1811.9}{R} \quad ; \quad S = 4.6 \text{ (km/h)} \quad (3)$$

$$V_{85,MC} = V_{85,PK} - \frac{61.31}{\sqrt{R}} \quad ; \quad S = 3.1 \text{ (km/h)} \quad (4)$$

$$V_{85,FK} = 1.05 V_{85,MC} + 0.103 \sqrt{R} \quad ; \quad S = 3.5 \text{ (km/h)} \quad (5)$$

La Figura 4 muestra el error acumulado del perfil de velocidad a lo largo de los puntos característicos, respecto de los datos medidos. En ella se muestra que dicho error varía entre 0.2 y 1.4 km/h, lo cual es aceptable considerando el error máximo especificado.

La Figura 5 muestra la relación entre las velocidades medidas y modeladas considerando todos los puntos de medición. La correlación es cercana a 1, por lo cual los modelos seleccionados muestran un buen desempeño.

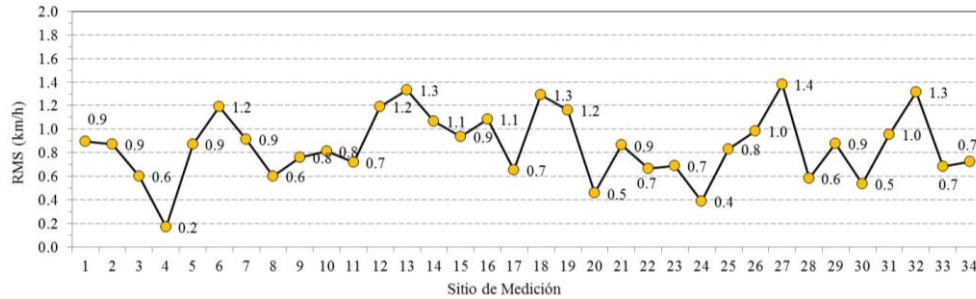


FIGURA 4: Error Acumulado del Perfil de Velocidad Modelado Respecto del Perfil Medido

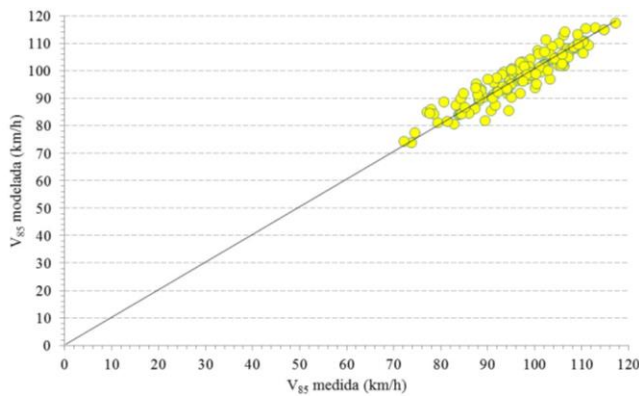
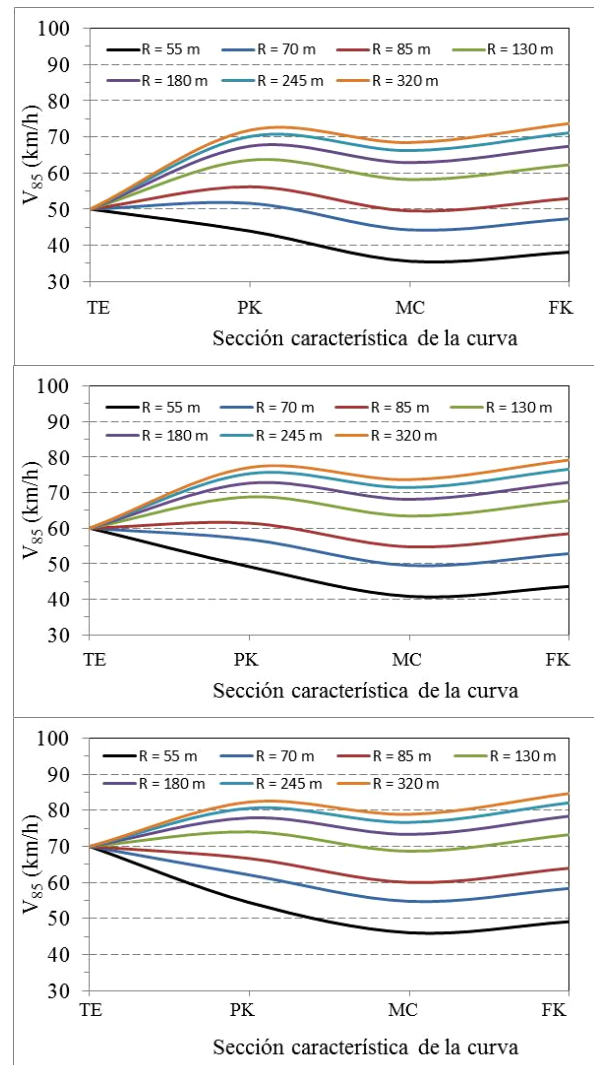


FIGURA 5: Correlación entre la Velocidad de Operación Medida y Modelada

### 5. ANÁLISIS LONGITUDINAL DE PERFILES DE VELOCIDAD

Para analizar el comportamiento de los perfiles de velocidad se estimó para cada punto característico el valor de la velocidad de operación usando las Ecuaciones 3, 4 y 5. En cada caso, se estimó la deceleración media entre TE y PK sobre una longitud fija de 200 m, la cual fue usada para calibrar los modelos.

Se eliminaron todas las curvas con radios tales que indujeran deceleraciones superiores a los 0.85 m/s<sup>2</sup>. Esta situación se dio esencialmente para las velocidades de entrada más altas, en donde se eliminaron los radios R = 55 m para velocidad entrada de 90 km/h y R = 55 m, R = 70 m para la velocidad de entrada de 100 km/h. Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 6.





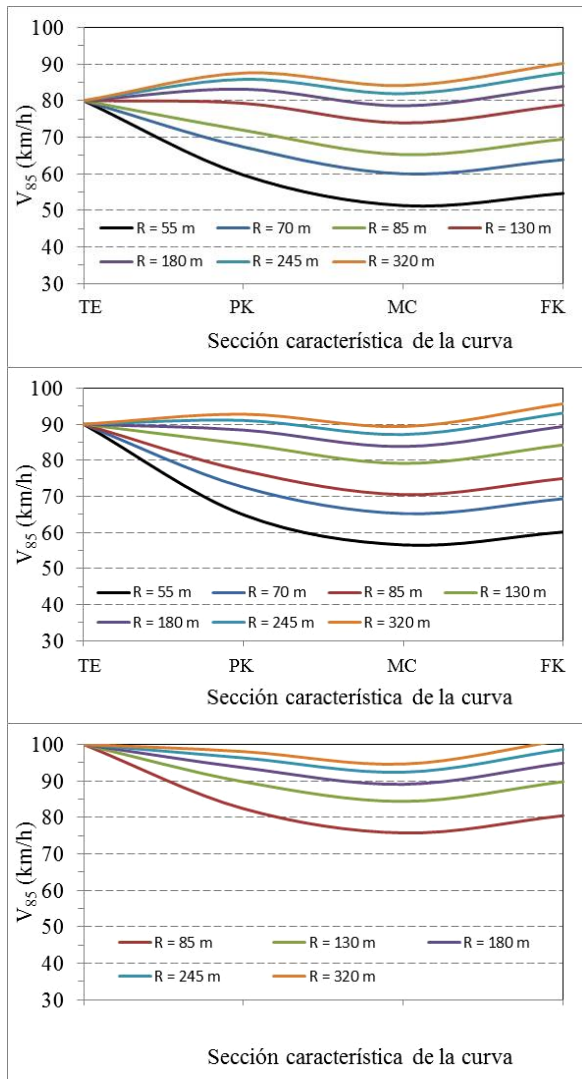


Figura 6: Perfiles de Velocidad para Radios entre 55 m y 320 m y Velocidad en Tangente de Entrada entre 50 y 100 km/h

A partir de los resultados obtenidos se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Para los radios de curvatura más bajos ( $R < 85$  m), el perfil de velocidad muestra una reducción de velocidad que llega a un mínimo en la mitad de la curva. Posteriormente el perfil exhibe un ligero aumento en la velocidad. Este perfil es coincidente con los perfiles de velocidad teóricos y las observaciones empíricas discutidas previamente en este trabajo.

En aquellas curvas en que la velocidad en la tangente de entrada oscila en torno a la velocidad de diseño de la curva,  $\pm 10$  km/h, el perfil de velocidad comienza a exhibir una ligera doble curvatura. Este comportamiento evidencia que para ciertos radios los conductores tienden a acelerar en la tangente de entrada.

Para velocidades de entrada entre 50 km/h y 70 km/h, el radio que delimita este comportamiento es de 85 m y para velocidades de entrada entre 80 y 100 km/h es de 130 m.  $R = 85$  m corresponde a una velocidad de diseño de 50 km/h y  $R = 130$  m a una velocidad de diseño de 60 km/h, según MOP (1994).

Para radios superiores a estos valores, independientemente de la velocidad de entrada, los conductores tienden a acelerar hasta la máxima velocidad que consideran segura para luego mantenerla en el interior de la curva.

Al analizar de manera conjunta el comportamiento de los perfiles de velocidad con el comportamiento de los modelos de velocidad de las Ec. 3, 4 y 5, se aprecia que la diferencia de velocidad a lo largo del perfil de velocidad se explica esencialmente debido a que el conductor percibe la curvatura y adapta su velocidad en la tangente de entrada.

En general, los desarrollos de las curvas con espirales no son suficientes para que el conductor modifique sustancialmente su velocidad al interior de la curva, por lo cual tiende a estabilizarla, como lo muestran los modelos de la Figura 6 en PK, MC y FK. Este resultado es consistente con el modelo teórico de Campbell et al (2008). Asimismo, obliga a revisar los modelos de velocidad de operación respecto del radio de curvatura puesto que la velocidad en la mitad de la curva no está explicada por la curvatura misma, sino que por la velocidad a la entrada de la curva, la que si depende de la curvatura y de la velocidad en la tangente de entrada.

## 6. CONCLUSIONES

Este artículo tuvo por objetivo analizar el comportamiento de la velocidad de operación en curvas horizontales aisladas en base a perfiles de velocidad. Estos perfiles describen la velocidad entre la tangente de entrada y el fin de la curva. Para ello se obtuvieron datos con GPS en 34 curvas con los cuales se calibraron nuevos modelos de velocidad de operación con los cuales se construyeron los perfiles de velocidad. Los resultados obtenidos permiten proponer las siguientes conclusiones:

Los modelos de velocidad existentes en la literatura no reflejan adecuadamente el comportamiento del perfil de velocidad. Esto se debe a que no incluyen el proceso de adaptación de velocidad que ocurre en la tangente de entrada y presuponen que este se produce en la mitad de la curva. La evidencia obtenida en este trabajo muestra que la adaptación ocurre en la tangente de entrada, y que por tanto es al principio de la curva donde se perciben los mayores efectos de la curvatura. Por el contrario, en el interior de la curva el efecto del radio no es relevante y si lo es la velocidad de ingreso.

Esto plantea la necesidad de revisar los modelos de velocidad de operación y geometría existentes y de reformular el concepto de curva horizontal lo cual implica que su geometría no solo está conformada por el arco circular y las espirales de entrada y salida, sino que también por la tangente de entrada.

Los perfiles de velocidad no siempre poseen una forma cóncava. Dependiendo de la relación entre el radio de curvatura y la velocidad en la tangente de entrada a la curva, pueden exhibir una doble concavidad debido a la tendencia observada en los conductores a acelerar en la tangente al visualizar curvas con curvatura baja.

Los resultados obtenidos en este trabajo tienen implicancias directas en el análisis de consistencia de curvas horizontales. Puesto que la consistencia se analiza en términos de la diferencia entre la velocidad de operación y la de diseño, el nivel de consistencia no solo depende de la velocidad de operación en la mitad de la curva, sino que además depende de la relación entre la velocidad en la tangente de entrada y la velocidad en la mitad de la curva. Para un mismo radio, mientras mayor es la velocidad en la tangente de entrada, más inconsistente es el diseño de la curva.

Por tanto, si los modelos velocidad–geometría no capturan el efecto de la tangente puede llevar a interpretaciones erróneas al comparar la velocidad de diseño con la velocidad de operación.

Esto plantea la necesidad de incluir en el análisis de consistencia el diferencial de velocidad en las curvas horizontales. En tal caso, las velocidades al ser variables aleatorias no pueden restarse directamente sin antes verificar la ausencia de covarianza entre las distribuciones de velocidad, o bien utilizar directa y complementariamente un método diferente de análisis de consistencia basado en las aceleraciones o en el diferencial de velocidad de operación.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) del Ministerio de Educación de Chile, por el financiamiento otorgado al proyecto FONDECYT 11090029, dentro del cual se desarrolló este trabajo.

## REFERENCIAS

- AUSTROADS (2013). **Expanded operating speed model**. Austroads Technical Report AP-T229-13, Australia.
- Bavkov, V. (1968) Road design and traffic safety. **Traffic Engineering & Control**, 9, 236–239.
- Cafiso, S. y Cerni, G. (2012) New Approach to Defining Continuous Speed Profile Models for Two-Lane Rural Roads. **Transportation Research Record**, 2309, 157 – 167.
- Cafiso, S., Di Graziano, A. y La Cava, G. (2005) Actual Driving Data Analysis for Design Consistency Evaluation. **Transportation Research Record**, 1912, 19 – 30.
- Campbell, J., Richard, C. y Graham, J. (2008) **Human factors guidelines for road systems**. NCHRP Report 600-B. Transportation Research Board, National Research Council, Estados Unidos.
- Echaveguren, T. (2010) **Modelación de velocidad de operación. Estado del arte**. Documento de Trabajo DT-01/10-11090029. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción.
- Echaveguren, T y Basualto, M. (2003). El análisis de aceleraciones en la consistencia de elementos simples de alineamientos horizontales. **Actas del XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 20 - 24 Octubre 2003, Santiago, Chile, 391-402.
- Figueroa, A. y Tarko, A. (2007) Speed changes in the vicinity of horizontal curves on two-lane rural roads. **Journal of Transportation Engineering**, 133(4), 215 – 222.
- Lamm, R. Choueiri, E. Hayward, J. y Paluri, A. (1988) Possible design procedure to promote design consistency in highway geometric design on two-lane rural roads. **Transportation Research Record**, 1195, 111 – 122.
- McFadden, J. y Elefteriadou, L. (2000) Evaluating horizontal alignment design consistency of two-lane rural highways: development of a new procedure. **Transportation Research Record**, 1737, 9–17.
- McLean, J. (1981) Driver speed behaviour and rural road alignment. **Traffic Engineering & Control**, 22(4), 208 – 211.
- Memon, R., Khaskheli, G.B. y Qureshi, S. (2008) Operating speed models for two-lane rural roads in Pakistan. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 35(5), 443-453
- MOP (1994) **Curvas circulares**. Volumen 3: Instrucciones de Diseño. Sección 3.203.3. Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- MOP (2012) **Curvas circulares**. Volumen 3: Instrucciones de Diseño. Sección 3.203.3. Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Simpson, D. y Kerman, J.A. (1982). The research and development background to “Highway Link Design”, **Traffic Engineering & Control**, 23(9), 414 – 421.

## ANEXO 1

Resumen de datos de radio, velocidad de diseño y de operación utilizados para evaluar los métodos de análisis de consistencia

Curva	R (m)	V <sub>D</sub> (km/h)	V <sub>RS</sub> (km/h)			
			TE	PK	MC	FK
4 - I	457	104.4	108.5	99.1	94.7	106.4
4 - II	457	104.4	118.2	106.8	109.7	113.2
7 - I	457	104.4	114.8	110.1	100.8	108.6
7 - II	457	104.4	115.0	113.4	106.9	106.7
11 - I	627	115.7	110.7	110.4	107.6	112.9
11 - II	509	108.4	120.6	112.0	108.8	110.8
12 - I	509	108.4	106.2	102.8	100.7	107.0
12 - II	627	115.7	112.6	108.5	105.6	105.0
19 - I	455	104.3	99.5	96.0	92.7	93.5
19 - II	222	77.4	106.3	96.6	92.4	98.0
20 - I	222	77.4	73.8	89.5	90.8	98.4
20 - II	455	104.3	105.3	95.1	93.5	97.3
21 - I	488	106.8	109.0	105.3	105.4	106.2
21 - II	466	105.1	106.3	103.7	98.5	98.2
22 - I	466	105.1	107.6	104.1	102.5	105.2
22 - II	488	106.8	114.6	108.3	102.5	107.1
37 - I	340	91.5	104.6	95.3	91.8	95.7
41 - I	312	88.0	108.5	102.0	93.1	96.0
44 - I	223	77.5	99.8	91.4	83.3	88.3
46 - I	330	90.0	83.9	84.4	79.4	77.2
47 - I	193	73.3	95.1	84.9	82.9	80.7
50 - I	190	72.9	84.2	78.0	72.3	74.6
52 - I	190	72.9	100.4	94.8	89.2	87.7
54 - I	687	119.2	102.1	104.9	106.0	106.5
55 - I	687	119.2	108.4	107.2	107.2	110.9
55 - II	687	119.2	109.5	107.4	108.9	105.3
60 - I	517	109.0	117.5	111.3	103.7	102.5
60 - II	676	118.6	104.0	103.6	101.9	102.3
61 - I	327	89.7	91.3	100.2	103.3	109.3
62 - I	402	100.1	110.4	104.5	98.8	103.3
63 - I	253	81.4	114.8	104.4	96.6	97.4
65 - I	296	86.2	93.6	93.7	90.9	92.0
66 - I	355	93.6	101.8	101.5	99.1	100.9
67 - I	192	73.2	95.2	94.3	88.3	93.3