

COMPARACION DE METODOS DE ANALISIS DE CONSISTENCIA DE CURVAS HORIZONTALES AISLADAS USANDO DATOS EMPIRICOS

Tomás Echaveguren, Universidad de Concepción, techaveg@udec.cl
Erwin Cárdenas, Universidad de Concepción, ercardenas@udec.cl

RESUMEN

El análisis de consistencia permite obtener diseños geométricos más seguros. Sobresalen dos métodos para su análisis: el método desagregado de Lamm y el método agregado de Polus. Se desconoce en el estado del arte si al usar ambos métodos se llega a resultados concordantes en la calificación de consistencia. En este artículo se realizó un análisis de ambos métodos usando datos de velocidad de operación obtenidas en terreno mediante un GPS. Se midieron 34 curvas horizontales aisladas. Se comparan ambos métodos en base a los índices de consistencia calculados. Se concluyó que ambos métodos son complementarios, por lo cual se recomienda usarlos en conjunto para analizar la consistencia en las carreteras.

Palabras clave: Consistencia del diseño geométrico, velocidad de operación, curvas horizontales aisladas

ABSTRACT

Consistency assessment is used for obtaining safer roads. Two methods highlights: the disaggregated method of Lamm and the aggregated method of Polus. It is not known in the state of the arts, whether both methods are equivalent one to each other. This paper performs an assessment of both methods based on operating speed obtained in-field using a GPS device. 34 single horizontal curves were measured. The consistency indexes of both methods were compared. It was concluded that both method are complimentary and should be used at the same time for highways consistency assessment.

Keywords: geometric design consistency, operating speed, single horizontal curves

1 INTRODUCCIÓN

La consistencia de un diseño geométrico se define en términos generales como la condición de armonía entre las expectativas de los conductores y lo que proporciona el diseño. En la medida que esta armonía exista, los diseños proporcionarán más seguridad a los usuarios. El análisis de consistencia y sus métodos, constituyen una herramienta de apoyo para los proyectistas, quienes en muchas ocasiones deben discriminar diferentes alternativas de diseño en pos de lograr diseños con un mayor nivel de seguridad. En el análisis de consistencia se calculan niveles de consistencia, los que permiten tomar decisiones respecto del trazado. Estas decisiones van desde modificar el diseño totalmente o parte de él, señalar, hasta mantenerlo como está.

Existen diversos métodos de análisis de consistencia que si bien tienen el mismo objetivo, difieren en enfoques y reglas de análisis. De acuerdo a Echaveguren et al (2009), los métodos de análisis de consistencia pueden clasificarse en agregados y desagregados. Los métodos desagregados permiten analizar elementos aislados del trazado, tales como curvas horizontales aisladas o curvas de inflexión en “S”. Los métodos agregados por su parte, permiten analizar segmentos largos del trazado. Entre los primeros se encuentran los de Lamm et al (1988) y Camacho-Torregrosa et al (2012), y entre los segundos el de Polus y Mattar-Habib (2004).

En el estado del arte se discuten ampliamente los métodos antes citados, pero dada la importancia de sus resultados en las decisiones de diseño cabe preguntarse si estos métodos son equivalentes entre sí. O bien si las decisiones sobre el diseño cambian o no al usar uno u otro método. De este modo, el objetivo de este trabajo es comparar los modelos de análisis de consistencia de Lamm et al (1988) y de Polus y Mattar-Habib (2004), uno enfocado a elementos aislados y el otro a segmentos largos del trazado.

En el trabajo, se comienza con una descripción sucinta de los métodos de análisis de consistencia antes citados, para luego presentar el método de toma de datos en terreno. En esta parte se incluye los criterios de selección de tramos de medición, la tarea de medición en terreno misma mediante GPS y el procesamiento de datos realizado para conformar la base de datos de azimut y velocidad. Posteriormente se describe el procedimiento de obtención de los perfiles de velocidad de diseño y de operación en cada una de las curvas. En el primer caso aplicando el retro-cálculo basados en la normativa con la cual fueron diseñados los tramos de medición y en el segundo caso en base al análisis estadístico de los datos. Finalmente se explican los criterios de cálculo de los indicadores de consistencia de Lamm y Polus, para luego comparar los métodos.

A partir de los resultados se concluyó que ambos métodos poseen limitaciones puesto que en el primero la consistencia está fuertemente influenciada por la velocidad de diseño y en el segundo, por el comportamiento de la velocidad de operación entre elementos sucesivos, es decir por la aceleración. Por tanto, los resultados que se obtienen al aplicar los métodos no son comparables. Considerando estos resultados, lo recomendable es fusionar ambos métodos de modo de considerar no sólo los efectos de la velocidad sino que también sus variaciones a lo largo de las curvas horizontales aisladas.

2 METODOS DE ANALISIS DE CONSISTENCIA

2.1 El método de Lamm

Lamm et al (1988) postularon que la consistencia de elementos horizontales de un trazado de carretera se puede describir en función de la diferencia entre la velocidad de diseño de una curva horizontal y la velocidad de operación en la misma. Mientras mayor sea la diferencia entre ambas, más inconsistente es el diseño de la curva.

De acuerdo a lo anterior, Lamm et al (1988) propusieron el indicador de consistencia para curvas horizontales aisladas (IC_1 , en km/h) de la Ec. 1.

$$IC_1 = |V_D - V_{85}| \quad (1)$$

En donde V_D corresponde a la velocidad de diseño de la curva en km/h, y V_{85} corresponde a la velocidad de operación, expresada como el percentil 85 de la distribución de frecuencia de velocidades medidas en la mitad de la curva. Este último valor de velocidad se puede obtener mediante mediciones directas en terreno o bien mediante modelo matemáticos (véase por ejemplo a Echaveguren y Sáez (2001)).

Sobre la base de estudios de accidentes en curvas horizontales realizados en Alemania y Estados Unidos, Lamm et al (1988) propusieron umbrales de consistencia en función del valor del índice IC_1 , que permiten establecer niveles de consistencia según:

- Nivel “bueno”: $IC_1 \leq 10$ km/h
- Nivel “regular”: $10 < IC_1 \leq 20$ km/h
- Nivel “malo”: $IC_1 > 20$ km/h

De este modo, mediante este criterio es posible calificar el diseño de curvas horizontales aisladas y establecer medidas correctivas que van desde la colocación de señales de velocidad (véase por ejemplo a Echaveguren et al (2012)), hasta el rediseño de la curva.

2.2 El método de Polus

Polus y Mattar-Habib (2004) postularon que la consistencia de un segmento de carretera está determinada por la variación de la velocidad de operación alrededor de su promedio a lo largo de un segmento de carretera. Mientras mayor es la diferencia entre ambas velocidades, mayor es la inconsistencia en el trazado. Para calcular la consistencia, propusieron el indicador de consistencia de las Ecuaciones 2, 3 y 4.

$$R_a = \frac{\sum |a_i|}{L} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{1}{3.6} \sqrt{\frac{(V_i - V_m)^2}{n}} \quad (3)$$

$$C = 2.808e^{(-0.278R_a\sigma)} \quad (4)$$

En la Ec. 2, R_a representa al área relativa normalizada por unidad de longitud, en m/s. El término $\Sigma |a_i|$ corresponde a la suma de las áreas (en valor absoluto) limitadas entre el perfil de velocidad de operación y la velocidad de operación promedio, en m^2/s y L es la longitud del segmento de estudio, en m.

El término σ de la Ec. 3 representa la desviación estándar de la velocidad de operación, en m/s. El término V_i corresponde a la velocidad de operación a lo largo de un segmento i de carretera (tangente o curva), en km/h, V_m es la velocidad de operación promedio ponderada por longitud a lo largo del segmento i , en km/h. La variable n corresponde al número de elementos geométricos a lo largo de la sección de carretera.

El indicador de la Ec. 4 describe la relación entre las variaciones de velocidad de operación alrededor de su valor medio espacial y una calificación de consistencia (C , en m/s) obtenida mediante juicio de expertos y datos de accidentes.

De este modo, mientras mayor es la variabilidad espacial de la velocidad de operación, menor es la calificación de consistencia y por tanto mayor es la inconsistencia del trazado. En base a lo anterior, Polus y Mattar-Habib (2004) propusieron los siguientes umbrales para definir niveles de consistencia:

- Nivel “bueno”: $C > 2$ m/s
- Nivel “regular”: $1 < C \leq 2$ m/s
- Nivel “malo”: $C \leq 1$ m/s

A diferencia del método de Lamm, el método de Polus se aplica a todo tipo de segmentos de trazado. Desde curvas horizontales aisladas, hasta segmentos largos con dos o más curvas sucesivas (inversas o no).

3 TOMA DE DATOS EN TERRENO

3.1 Selección de tramos de medición

Los tramos de medición 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 sólo 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, vehículos 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 inspeccionó 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.

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 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 trabajos 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.

4 ESTIMACION DE PERFILES DE VELOCIDAD

Los perfiles de velocidad representan los valores de velocidad de diseño y operación a lo largo de la trayectoria. Para determinarlos se requiere vincular las velocidades con la geometría del trazado en los cuatro puntos característicos ya definidos. Estos puntos se obtuvieron a partir de los perfiles geo-referenciados de azimut de la trayectoria c/r a la distancia medidos en terreno.

4.1 Estimación de perfiles de velocidad de operación

La velocidad de operación se estimó en cada uno de los puntos característicos (TE, PK, MC y FK) de las curvas horizontales aisladas. Alrededor de cada uno de ellos se tomaron los 40 datos vecinos, obteniendo así un tamaño muestral de entre 820 y 1230 datos de velocidad, dependiendo de la cantidad de vehículos medidos. Posteriormente se estimó en TE, PK, MC y FK el percentil 85 de la distribución de frecuencia de velocidad medida con el logger GPS. El perfil de velocidad de operación quedó determinado por la unión de los pares ordenados (metraje, velocidad de operación) ubicados en TE, PK, MC y FK.

4.2 Estimación de perfiles de velocidad de diseño

La velocidad de diseño de cada curva se estimó de acuerdo a los criterios de diseño de curvas horizontales establecidos usando la Ec. 5 MOP (1994). En dicha ecuación, V_D corresponde a la velocidad de diseño, en km/h, R corresponde al radio medio de curvatura, en m y f corresponde al coeficiente de fricción máximo de acuerdo a MOP (1994), en decimal.

$$V_D = \sqrt{190.5fR} \quad (5)$$

Cabe resaltar que si bien la normativa de diseño geométrico de curvas horizontales ha sido actualizada, los tramos de medición están proyectados usando la normativa de 1994, por lo cual se consideró válido utilizar dichos criterios para estimar la velocidad de diseño.

La velocidad de diseño se calculó asumiendo que ésta es la misma en cada uno de los puntos característicos de las curvas horizontales utilizadas. Por tanto, se obtuvo un valor único de V_D en cada curva analizada.

4.3 Resumen de base de datos para el cálculo de indicadores

La Tabla 1 muestra un resumen de los datos relevantes para el análisis en cada una de las curvas medidas en terreno: el radio geométrico (R , en m), la velocidad de diseño (V_D , en km/h) y la velocidad de operación (V_{85} , en km/h) en cada uno de los puntos característicos.

Tabla 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 _D (km/h)	V ₈₅ (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

5 ANALISIS DE INDICES DE CONSISTENCIA DE LAMM Y POLUS

5.1 Cálculo de índices de consistencia

Los índices de consistencia se calcularon usando directamente los datos del perfil de velocidad y de operación. Para calcular el índice de consistencia de Lamm, se consideró como velocidad de operación representativa la estimada en la mitad de la curva (MC). Para el cálculo del índice de consistencia de Polus en cambio, se consideraron 2 escenarios. En el primer escenario el valor de σ (Ec. 3), y por tanto de C , queda definido en términos de la velocidad de operación y de la velocidad de operación promedio, tal cual lo propone el método original. En el segundo escenario en la expresión de cálculo de σ (Ec. 3), se sustituye la velocidad de operación media (V_m) por la velocidad de diseño, quedando la Ec. 3 de la siguiente manera.

$$\sigma_D = \frac{1}{3.6} \sqrt{\frac{(V_i - V_D)^2}{n}} \quad (6)$$

Posteriormente se aplica la Ec. 4 para estimar el índice de consistencia de Polus de acuerdo a la Ec 7. En ambos casos, las unidades de medida de las ecuaciones se mantienen.

$$C_D = 2.808e^{(-0.278R_a\sigma_D)} \quad (7)$$

El término R_a de la Ec. 7 se aplica de acuerdo a la Ec. 3, pero en este caso la expresión $\Sigma |a_i|$ queda determinada por la suma de las áreas (en valor absoluto) limitadas entre el perfil de velocidad de operación y la velocidad de diseño del tramo respectivo.

5.2 Análisis comparativo de los indicadores de consistencia

Posteriormente, con los datos estimados de acuerdo a lo descrito en la sección 5.1, se realizaron los siguientes análisis:

- Comparación entre el índice de consistencia de Lamm, para todos los radios de curvatura, respecto del índice de consistencia de Polus como función de la velocidad de operación promedio (Figura 1).
- Comparación entre el índice de consistencia de Lamm, segregado en 3 niveles de radio de curvatura, respecto del índice de consistencia de Polus como función de la velocidad de operación promedio (Figura 2).
- Comparación entre el índice de consistencia de Lamm, para todos los radios de curvatura, respecto del índice de consistencia de Polus como función de la velocidad de diseño de las curvas (Figura 3).
- Comparación entre el índice de consistencia de Lamm, segregado en 3 niveles de radio de curvatura, respecto del índice de consistencia de Polus como función de la velocidad de diseño de las curvas (Figura 4).

En las Figuras 1 y 2, los cuadrantes 1, 2 y 3 representan niveles de consistencia “regular” bajo el criterio de Lamm y los cuadrantes 4, 5 y 6 un nivel de consistencia “bueno” también bajo el criterio de Lamm. Asimismo, los cuadrantes 1 y 4 representan un nivel de consistencia “malo” bajo el criterio de Polus, los cuadrantes 2 y 5 representan un nivel de consistencia “regular” y los cuadrantes 3 y 6 un nivel de consistencia “bueno”, también bajo el criterio de Polus. De este modo, los cuadrantes 2 y 6 corresponden a aquellos en que los dos métodos de análisis de consistencia son equivalentes.

Figura 1: Comparación entre el índice de consistencia de Lamm (IC_1) y de Polus (C) para todos los radios de curvatura.

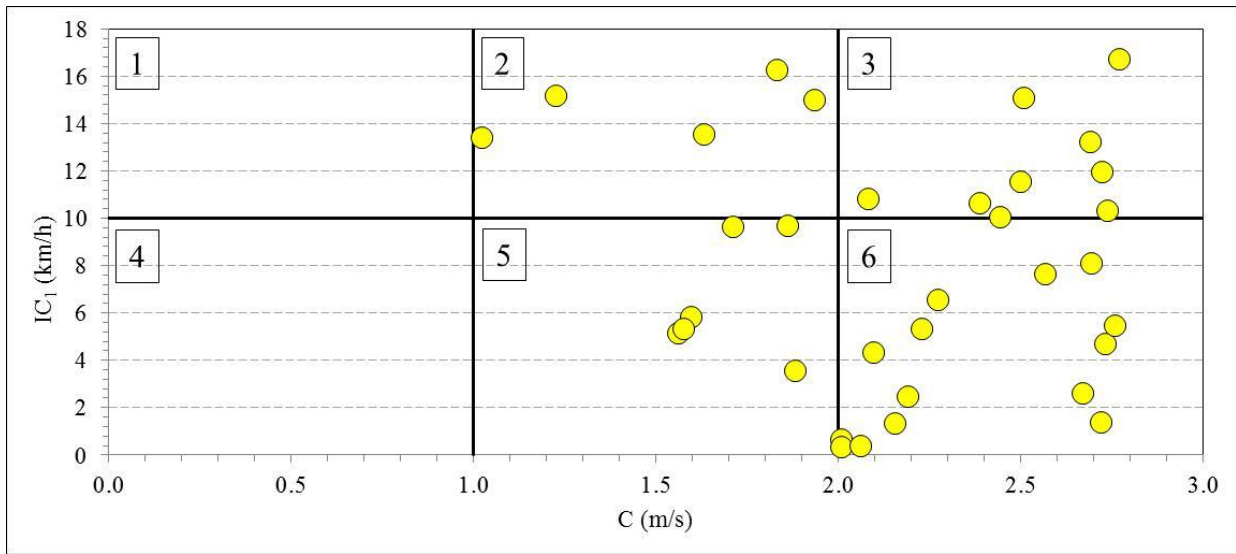
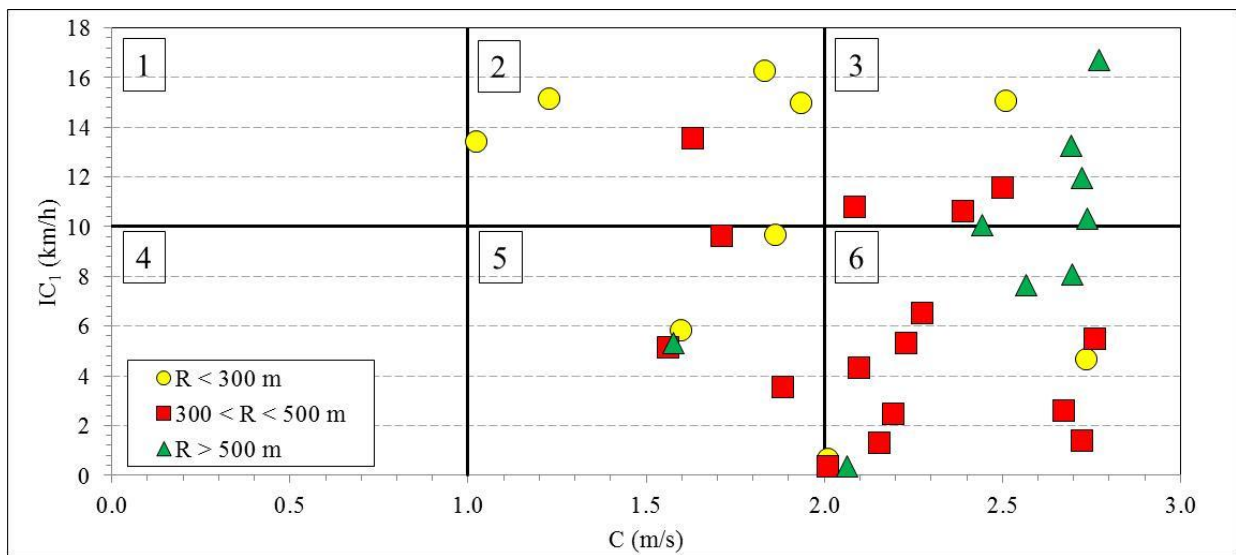


Figura 2: Comparación entre el índice de consistencia de Lamm (IC_1) y de Polus (C) para distintos niveles de radio de curvatura.



En la Figura 1 se puede apreciar que de las 34 curvas analizadas 19 (56 %) se encuentran en los cuadrantes equivalentes de ambos métodos de análisis de consistencia. Esto es, el diseño de 5 curvas poseen un nivel de consistencia “regular”, identificado por ambos métodos, y 14 curvas poseen un nivel de diseño “bueno” detectado por ambos métodos. En contraste, 15 curvas (44 %) poseen calificaciones dispares y que dependen del método. Estas corresponden a las curvas localizadas en los cuadrantes 3 y 5 de calificación de consistencia. Esta evidencia muestra que efectivamente hay casos en que el nivel de consistencia depende del método. Las causas de estas diferencias son las siguientes:

- Las curvas localizadas en el cuadrante 3 exhiben diferencias entre la velocidad de operación y de diseño superior a 10 km/h. Puesto que los perfiles de velocidad de dichas curvas son relativamente uniformes, la variabilidad alrededor de la velocidad promedio dentro de la curva es baja. En consecuencia, tanto el valor de R_a como σ son bajos y por lo tanto el indicador C de consistencia de Polus es alto y superior a 2.0. Esto implica que cuando los perfiles de velocidad al interior de la curva son uniformes, el método de Polus estima niveles altos de consistencia, pero puede darse que según el método de Lamm la consistencia sea “regular” o “mala” dependiendo de la diferencia entre la velocidad de operación y de diseño.
- Las curvas localizadas en el cuadrante 5 exhiben un nivel de consistencia “bueno” bajo el esquema de Lamm dado que la diferencia entre la velocidad de operación y de diseño es inferior a 10 km/h. Dado que los perfiles de velocidad de estas curvas son no uniformes, los valores de R_a y σ tienden a ser elevados, con lo cual el valor de C disminuye y el nivel de consistencia según Polus también. Este comportamiento es propio de las curvas horizontales en donde existen marcados cambios de velocidad de operación desde la tangente de aproximación y al interior de la curva, con lo cual la oscilación de la velocidad en torno a su promedio aumenta, independientemente de la velocidad de diseño.

Al desagregar los radios de curvatura en 3 niveles (Figura 2) se pueden obtener conclusiones adicionales a las obtenidas del análisis del conjunto de radios. En curvas con radios inferiores a los 300 m los niveles de consistencia obtenidos con ambos métodos tienden a resultados similares. Para radios entre 300 y 500 m comienza a aparecer el efecto de la variabilidad en la velocidad de operación a lo largo de la curva dado que un grupo de valores se localizan en el cuadrante 5 y en el cuadrante 3 pero cercanos al cuadrante 6. Para radios superiores a los 500 m, la mayor parte de las curvas califican como “bueno” según el método de Polus, pero tienden a calificar como regulares según el método de Lamm.

Esto último se debe a que para radios grandes el perfil de velocidad tiende a ser uniforme a lo largo de la curva, lo cual explica el valor elevado del índice de consistencia de Polus. Pero en contraparte, los conductores tienden a seleccionar velocidades de operación superiores a la de diseño, lo cual explica el valor más elevado del índice de Lamm.

Los resultados obtenidos evidencian que la equivalencia de ambos métodos descansa esencialmente en la diferencia de velocidades de diseño y operación, asumiendo que la velocidad de operación desde la tangente de entrada a la curva hasta la salida de la curva es uniforme. Las mediciones obtenidas en terreno muestran que este supuesto depende del radio de curvatura, por

lo cual los métodos de análisis de consistencia de Lamm y Polus no son equivalentes para estudiar la consistencia del diseño de curvas horizontales aisladas.

Las Figuras 3 y 4 muestran los índices de consistencia de Lamm y Polus. En este último índice se sustituyó la velocidad promedio por la velocidad de diseño de acuerdo a las Ec. 6 y 7. Al igual que en el caso anterior, primero se analizan todos los radios y luego segmentando los radios en 3 grupos.

Figura 3: Comparación entre el índice de consistencia de Lamm (IC_1) y de Polus ajustado por velocidad de diseño (C_D) para todos los radios de curvatura.

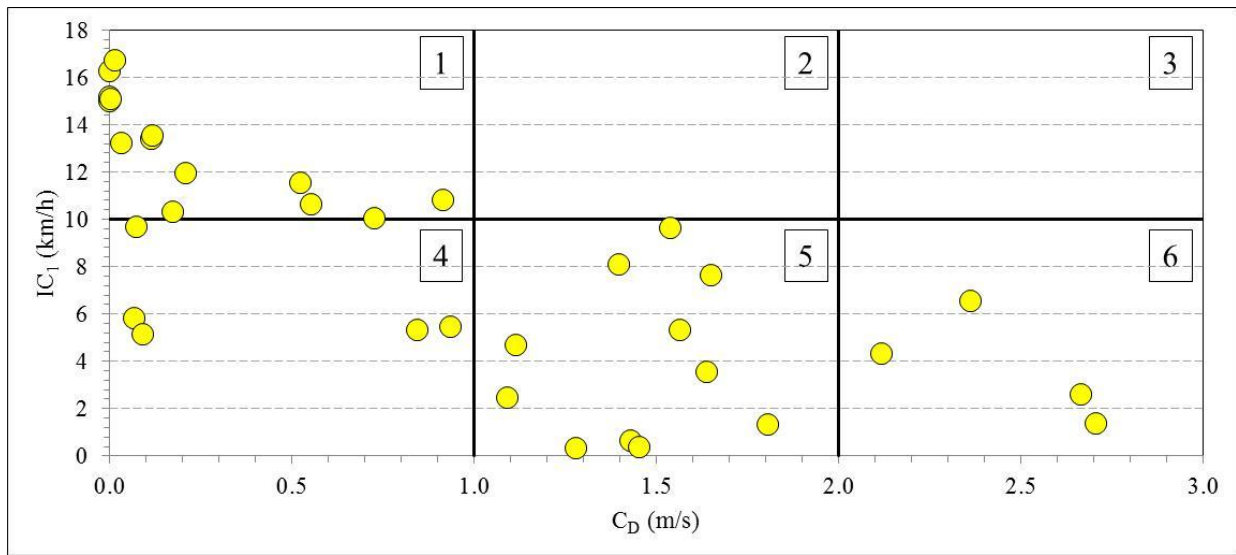
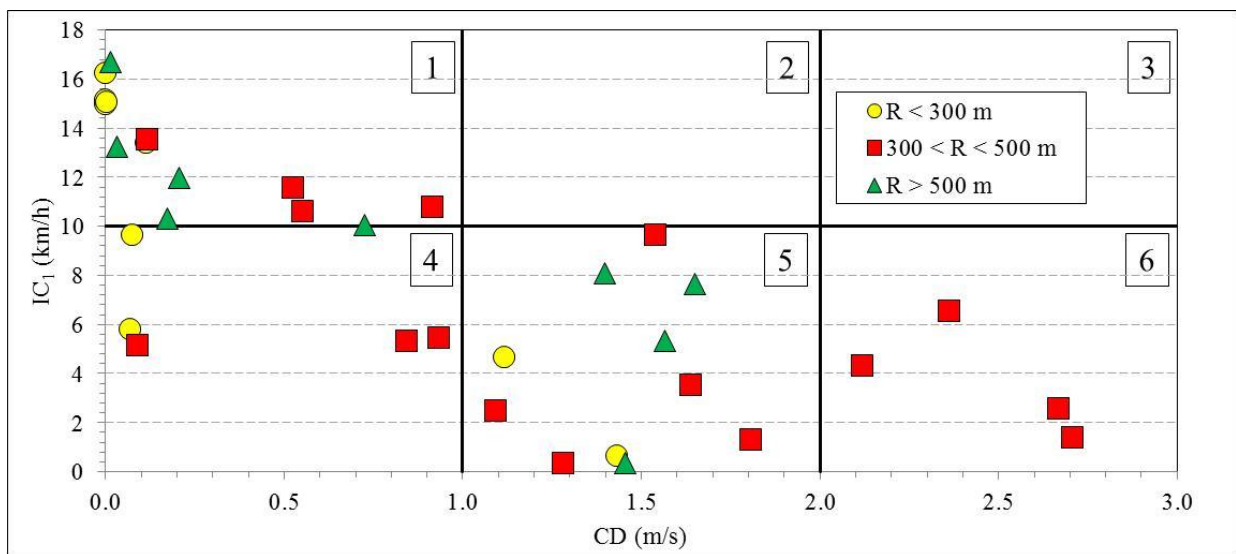


Figura 4: Comparación entre el índice de consistencia de Lamm (IC_1) y de Polus ajustado por velocidad de diseño (C_D) para distintos niveles de radio de curvatura.



Las Figuras 3 y 4 muestran un patrón de comportamiento distinto al de las Figuras 1 y 2, toda vez que existe una ligera correlación entre los 2 indicadores de consistencia. Al incluirse la velocidad de diseño en el indicador de consistencia de Polus, se establece un medio para vincular tanto la variabilidad a lo largo de las curvas como alrededor de la velocidad de diseño, parámetro relevante para el diseño geométrico. A partir de las Figuras 3 y 4 se puede concluir lo siguiente:

Del total de las curvas analizadas, el 62 % (21 curvas), se localiza en los cuadrantes 4, 5, y 6 (Figura 3). Esto implica que para una variación de hasta 10 km/h entre la velocidad de diseño y de operación, existe una variabilidad en todo el rango del índice de Polus que depende de la variabilidad del perfil de velocidad de operación a lo largo de la velocidad de diseño. Se puede apreciar también que el resto de curvas (38 %) se localiza en cuadrante 1, lo cual indica que estas curvas tienen una amplia variabilidad en la velocidad al interior de la curva y a la vez una diferencia entre velocidad de diseño y de operación superior a los 10 km/h.

La Figura 4 no muestra una tendencia clara de la variabilidad de los métodos respecto de la clasificación de radios de curvatura, básicamente debido al tamaño de la muestra obtenida en terreno. Se puede apreciar que en general los indicadores asociados a radios inferiores a 300 m (correspondiente a $V_D = 85$ km/h) tiende a localizarse en los cuadrantes 1 y 4, lo cual indica que los perfiles de velocidad de operación se alejan de la velocidad de diseño y al mismo tiempo poseen variabilidad a lo largo de la curva, lo cual evidencia inestabilidad en la velocidad de circulación. Este efecto se diluye para radios de curvatura superiores a 500 m (correspondientes a $V_D = a 105$ km/h), en donde la estabilidad del perfil de velocidad está influida más por la velocidad de entrada a la curva que por el radio geométrico mismo.

6 CONCLUSIONES

El trabajo discutió dos métodos de análisis de consistencia de curvas horizontales aisladas: El método de Lamm, que estima el nivel de consistencia a partir de la diferencia entre la velocidad de diseño y de operación en curvas, y el método de Polus, que establece niveles de consistencia en función de la variabilidad de la velocidad alrededor de la velocidad promedio en de la curva.

El modelo de Lamm aplicado a curvas horizontales simples compara la diferencia entre la velocidad de operación en la mitad de la curva y la velocidad de diseño. Por tanto no detecta inconsistencias debido a la variación espacial de la velocidad de operación desde la tangente de entrada a la curva hasta la mitad de la misma. En contraparte, el modelo de Polus si detecta estas oscilaciones pero al no incluir la velocidad de diseño en su formulación no detecta las diferencias entre velocidad de diseño y operación.

Los resultados obtenidos muestran que para el análisis de consistencia no sólo es relevante la diferencia entre la velocidad de operación y de diseño en una curva, sino que también la variabilidad de las velocidades a lo largo de la curva. Si el perfil de velocidad de operación es uniforme pero muy diferente de la velocidad de diseño, se obtendrá una calificación “regular” o eventualmente “mala” del diseño según el indicador de Lamm y una calificación “buena” según el criterio de Polus. Lo anterior implica que los métodos de análisis de consistencia de Lamm y Polus son complementarios y no equivalentes, por lo cual deben usarse en conjunto o bien unificarse en un sólo método de análisis de consistencia.

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

Camacho-Torregrosa, F. Pérez-Zuriaga, A. Campoy-Ungría, J. y García, A. (2012) New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation. **Accident Analysis & Prevention**. DOI: 10.1016/j.aap.2012.10.001.

Echaveguren, T. y Sáez, J. (2001) Estudio de relaciones velocidad – geometría horizontal en vías de la VIII Región. **Actas del X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**. 9-12 Octubre 2001, Concepción, 341-350.

Echaveguren, T. Altamira, A. Vargas-Tejeda, S. y Riveros, D. (2009) Criterios para el análisis de consistencia del diseño geométrico: Velocidad, fricción, visibilidad y criterios agregados. **XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito (CD-Rom)**. 14-18 Septiembre 2009, Mar del Plata, Artículo A-059.

Echaveguren, T. Arellano, D. y Vargas-Tejeda, S. (2012) Estudio empírico de velocidad de operación de vehículos pesados en pendientes ascendentes. **XVII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística**. (Cd-Rom). 24 – 27 Septiembre 2012, Santiago, Artículo # 326.

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.

MOP (1994) **Curvas circulares**. Volumen 3: Instrucciones de Diseño. Sección 3.203.3. Ministerio de Obras Públicas, Chile.

Polus, A. y Mattar-Habib, C. (2004) New consistency model for rural highways and its relationship to safety. **Journal of Transportation Engineering**, 130(3), 286 – 293.

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