CONSISTENCIA EN EL DISEÑO DEL ALINEAMIENTO HORIZONTAL: UNA FORMA DE EVALUAR EL PROYECTO GEOMÉTRICO DE UNA CARRETERA

HORIZONTAL ALIGNMENT DESIGN CONSISTENCY: A WAY TO EVALUATE THE GEOMETRIC DESIGN OF A ROAD

Darinel Galindo Aguilar[1]
Emilio Abarca Pérez[2]

1 Ing. Civil. Universidad Autónoma de Chiapas (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México): galindoagui@gmail.com

2 M.I. de Vías Terrestres. Universidad Autónoma de Chihuahua (Chihuahua, Chihuahua, México) emilio.abarca@uaq.edu.mx

RESUMEN

Los accidentes con el mayor número de heridos y muertes se presentan en las curvas horizontales de las carreteras, esto puede deberse a los cambios bruscos en las características de la carretera. Lo que ha llevado a las investigaciones a centrarse en cómo mejorar los proyectos geométricos y con ello la seguridad vial. En este sentido, una de las estrategias más prometedoras es la implementación de la consistencia en el diseño, el cual busca medir, entre otros, las expectativas de los conductores. De este modo, poder evaluar los diseños geométricos.

A lo largo de los años, diversos autores han ido creando sus propias metodologías sobre cómo evaluar la consistencia de curvas horizontales. En este artículo, se presenta una revisión del estado del arte de manera selectiva y crítica que contiene la información esencial de la consistencia en el diseño del alineamiento horizontal y sus enfoques, así como también, algunas ventajas y desventajas que tienen las diversas metodologías. Todo esto, mediante la resolución de las preguntas motivadores de análisis: ¿Cuáles son las metodologías para la evaluación de la consistencia del alineamiento horizontal?, y ¿qué metodologías son las más usadas?

Se encontró, por un lado, que el enfoque de consistencia no solo está asociado con una variable, sino con varias, como: La velocidad de operación, la desaceleración y aceleración de operación, la visibilidad disponible, entre otros. De las cuales, la más usada es la velocidad de operación, debido a la practicidad en su medición. Por otro lado, también se encontró que existen metodologías que se aplican a segmentos aislados de una carretera, así como también a segmentos compuestos y largos.

A pesar de que existen diversas formas de evaluar la consistencia, todos los métodos tienen el mismo fin, tratar de medir las expectativas de los conductores. Esto debido a que es la mejor variable subjetiva para entender cómo los conductores perciben el trazo de una carretera y cómo actúan ante las diferentes configuraciones geométricas.

Palabras claves: Consistencia en el diseño; proyecto geométrico de carreteras; seguridad vial; velocidad.

ABSTRACT

The accidents with the highest number of injuries and deaths occur on the horizontal curves of the roads, this may be due to sudden changes in the characteristics of the road. What has led research to focus on how to improve geometric projects and thus road safety. In this sense, one of the most promising strategies is the implementation of consistency in design, which seeks to measure, among others, the expectations of drivers. In this way, to be able to evaluate geometric designs.

Over the years, various authors have created their own methodologies on how to evaluate the consistency of horizontal curves. In this article, a review of the state of the art is presented in a selective and critical way that contains the essential information of the consistency in the design of the horizontal alignment and its approaches, as well as, some advantages and disadvantages that the various

methodologies have. All this, by solving the motivating questions for analysis: What are the methodologies for evaluating the consistency of horizontal alignment?, and what methodologies are the most used?

It was found, on the one hand, that the consistency approach is not only associated with one variable, but with several, such as: Operation speed, operation deceleration and acceleration, available visibility, among others. Of which, the most used is the speed of operation, due to the practicality of its measurement. On the other hand, it was also found that there are methodologies that are applied to isolated segments of a highway, as well as to compound and long segments.

Although there are several ways to assess consistency, all methods have the same purpose, trying to measure the expectations of drivers. This is because it is the best subjective variable to understand how drivers perceive the outline of a road and how they act in the face of different geometric configurations.

Keywords: Consistency in design; geometric road design; road safety; speed.

INTRODUCCIÓN

Cuando hablamos de vías terrestres, un tema imprescindible es la seguridad de las personas y bienes que están siendo transportados. En este sentido nos podemos preguntar ¿Qué tan seguro es una carretera?, muchos podrán pensar que si el proyecto geométrico se encuentra en concordancia con la normativa de diseño geométrico de carreteras, los caminos deben ser seguros, lamentablemente los accidentes siguen ocurriendo, de este modo, Radimsky et al. (2016) mencionan que el segmento de la carretera en donde los accidentes que resultan con más muertes o heridos es en curvas horizontales y que la principal causa es el exceso de velocidad. Comúnmente estos accidentes son atribuidos a errores de los conductores, pero, también es importante mencionar que el conductor es un operador de una máquina, a través de la cual percibe el entorno y toma decisiones a cada instante en función de la información que recibe (Echaveguren et al., 2009). Es por ello que Krammes (1997) argumenta que los cambios bruscos en las características de la carretera sorprenden a los conductores, resultando en errores de velocidad o maniobras críticas de manejo que conducen a colisiones. Por ello, Fitzpatrick (2000) encontró que los conductores cometen menos errores cuando las características geométricas se ajustan a sus expectativas. De aquí parte el concepto de consistencia del diseño, de acuerdo con Russo et al. (2012) definen la consistencia del diseño como la condición en que el alineamiento de la carretera no viola las expectativas del conductor.

Una de las estrategias más prometedoras para mejorar la seguridad vial en las carreteras rurales según Jacob y Anjaneyulu (2013) es la implementación del concepto de consistencia en el diseño. De acuerdo a García et al. (2013), este concepto se centra en la interacción entre los factores humanos y de infraestructura.

A lo largo de los años, diversos autores han ido creando sus propias metodologías sobre cómo evaluar la consistencia de curvas horizontales. En este artículo se presenta una revisión crítica de la literatura sobre este tema, así como también algunas ventajas y desventajas que tienen las diversas metodologías.

METODOLOGÍA

El artículo que se presenta es una revisión del estado del arte de manera selectiva y crítica que contiene la información esencial de la consistencia en el diseño del alineamiento horizontal y sus enfoques. La bibliografía obtenida para la realización del artículo fue descargada de base de datos especializadas. Fueron revisados cerca de 90 artículos científicos relacionados con el tema, los cuales fueron clasificados de acuerdo con su importancia en la resolución de las preguntas motivadoras de análisis: ¿Cuáles son las metodologías para la evaluación de la consistencia del alineamiento horizontal?, y ¿qué metodologías son las más usadas?

RESULTADOS

El diseño del proyecto geométrico de carreteras ha ido evolucionando a lo largo de los años. Primeramente, nos encontramos con el diseño tradicional; el cual se basa en determinar todos los elementos geométricos con base en la velocidad de proyecto, en donde supuestamente los conductores de los

vehículos no superaran dicha velocidad a lo largo del proyecto (Solminihac et al., 2007).

El diseño neotradicional considera la evaluación de la homogeneidad del trazado y de la tasa de cambio de la velocidad de proyecto a lo largo del trazo. De este modo, se mejora la seguridad del tránsito debido a que se puede verificar el diseño (Solminihac et al., 2007).

El diseño sensitivo busca el equilibrio del diseño entre el conductor y la naturaleza, sin olvidar la seguridad (McLean, 1981; Stamatiadis, 2005).

Finalmente, el diseño consistente trata de ir más allá y evita restringir/limitar al conductor en su tránsito por la carretera, permitiendo un tránsito más estable poco condicionado, esto sin olvidar los criterios básicos de la geometría de una carretera (AASHTO, 2004). Un diseño consistente, de acuerdo con Glennon y Harwood (1978) es aquel que no altera la capacidad del conductor para dirigir y mantener bajo control el vehículo, por lo que se encuentra en relación directa con las expectativas del conductor.

1. Consistencia del diseño / diseño consistente

La consistencia en el diseño de una carretera es armonizar los segmentos de la carretera, evitando cambios bruscos en los radios de curvatura, velocidad de operación, entre otros (Messer, 1980).

Primeramente, McLean (1981) sentó las bases de que la diferencia entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación era causada por la inconsistencia del diseño. Gracias a ello, Lamm et al. (1986, 1987, 1991) realizaron continuos estudios de campo hasta lograr crear sus tres criterios de evaluación de consistencia del diseño, los cuales tratan de medir las expectativas de los conductores.

Lamm no fue el único en tocar este tema, Polus y Dagan (1987) también propusieron un método de evaluación de la consistencia, éste se encuentra basado en el análisis estadístico de las diferencias en los radios de curvatura en segmentos de una carretera.

La consistencia en el diseño no solo se encuentra relacionada con las características geométricas de las curvas, sino también con la carga mental del conductor (*mental workload*) (Messer, 1980), la consistencia del diseño está relacionada con el trabajo de conducción, de esta manera, si un diseño es inconsistente provoca que la carga mental aumente, lo que a su vez, reduce la eficiencia del desempeño del conductor y aumenta el riesgo de provocar un accidente.

1.1 Criterios de Lamm et al. (1986, 1987, 1991)

Lamm et al. (1986, 1987, 1991) estudiaron dos elementos geométricos: curvas compuestas y curvas aisladas simples. Con base en el comportamiento de dichos elementos, determinaron que entre la Tasa de Cambio de Curvatura (CCR) y la ocurrencia de accidentes había una correlación positiva. Concluyeron que los conductores, en función de su percepción de la curva próxima, elegían su velocidad de operación; la cual no siempre corresponde a la velocidad de proyecto.

A su vez, determinaron que la diferencia entre la fricción lateral requerida y la de proyecto, también era un criterio de

inconsistencia. Esto debido a que, cuando el conductor supera la velocidad de proyecto genera mayor fricción, con lo cual se puede llegar a superar la fricción de proyecto hasta alcanzar el desplazamiento en la curva.

1.2 Criterios de Polus et al. (1987, 2004)

El objetivo de Polus et al. (1987, 2004) fue desarrollar criterios de evaluación de consistencia que se pudieran aplicar a segmentos largos de trazado (carreteras). Primeramente, Polus y Dagan (1987) desarrollaron un criterio de evaluación con base en el análisis de la diferencia de radios de curvatura.

Más adelante, Polus y Mattar-Habib (2004) determinaron un criterio de evaluación de consistencia más extenso, en donde asumieron que conforme exista una mayor varianza punto a punto entre la velocidad de proyecto y de operación y, que, conforme la diferencia total en una carretera entre ambas velocidades sea mayor, la inconsistencia crecerá exponencialmente en la carretera.

Estos criterios son más generales que los de Lamm y tienen la ventaja de poder analizar trazados (carreteras) completos, pero aquí no se incluye la estabilidad dinámica (específicamente de fricción lateral). En ese sentido, Solminihac et al. (2007) mencionan que para usar el concepto de estabilidad dinámica se requiere realizar un análisis muy específico, en el que se incluya la oferta de fricción en curvas, por lo que resulta un método poco práctico para ser usado.

1.3 Criterio de carga mental

La carga mental, según Sebastián y Del Hoyo (2002) es el nivel de actividad mental o de esfuerzo intelectual necesario para desarrollar un trabajo o tarea, el nivel depende de las exigencias mentales de la tarea, y de la capacidad de respuesta de la persona.

En este sentido, Messer (1980), determinó que la consistencia en el diseño también esta correlacionado con la carga mental del conductor, de ese modo, una carretera con un diseño inconsistente demanda una gran carga mental al conductor, lo que se traduce a una mayor probabilidad de desempeñar una maniobra errónea y provocar un accidente.

Este criterio trata de determinar la carga mental del conductor derivado de los diferentes trazos de la carretera, esto debido a que hay un intervalo óptimo de carga mental en el cual se alcanza el nivel más alto en la calidad del trabajo de conducción (Fuller, 2002).

El desarrollo de este criterio ha sido muy lento debido a que los parámetros que determinan la carga mental como; tiempo de respuesta (Makishita y Matsunaga, 2008), ritmo cardíaco (Jahn, 2005), oclusión visual (Van der Horst, 2004), son muy difíciles de medir, debido a que se necesita de una experimentación controlada con uso de instrumentos de gran costo monetario para poder llevarlos a cabo.

1.4 Criterio de homogeneidad geométrica

En este criterio se asume que los cambios radicales en los radios de curvatura provocan cambios radicales en la velocidad de operación, lo que incrementa la probabilidad de accidentes. Investigaciones realizadas por Castro et al. (2005) determinaron que diseños geométricamente homogéneos mantienen

velocidades más constantes gracias al aumento en la consistencia del diseño.

2. Parámetros de consistencia en el diseño

Los parámetros de consistencia se clasifican de acuerdo con sus variables explicativas. Es así como se pueden identificar parámetros basados en velocidad, fricción, en la velocidad de aproximación y en la carga de trabajo del conductor.

2.1 Parámetros basados en la velocidad

Este tipo de parámetro es usado en curvas horizontales aisladas y compuestas, es determinado mediante la diferencia entre la velocidad de proyecto y la velocidad de operación. Cuando tenemos una curva horizontal existente, la velocidad de operación es calculada en campo (comúnmente a la mitad de la curva) para que en gabinete se estime el percentil 85 (V_{85}). Mientras que la velocidad de proyecto para carreteras aun no construidas (que se encuentran en proyecto) es estimada mediante un modelo que correlaciona el V_{85} con algún o algunos elementos geométricos de la curva, por ejemplo, el radio de curvatura, la longitud de curva, la pendiente, el ángulo de deflexión, entre otros (McFadden y Elefteriadou, 2000). A continuación, se muestra la ecuación 1 la cual es un ejemplo de este tipo de parámetro (AASHTO, 2004).

$$CCR = \frac{63.7\ (\frac{L_{c1}}{2R} + \frac{L_{cr}}{R} + \frac{L_{c2}}{2R})}{L} \qquad \text{Ecuación 1}$$

$$V_{85} = \exp(4.561 - 0.000527\ CCR) \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

CCR = Grado de curvatura, expresado en Gon por kilómetro (1 Gon = 0.9°)

LCR = Longitud de la curva circular (metros)

$Lc1$ = Longitud de la espiral anterior de la curva circular (metros)

$Lc2$ = Longitud de la espiral posterior de la curva circular (metros)

L = Longitud total (*Lc1* + *Lc2* + *LCR*) (metros)

R = Radio de la curva circular (metros)

La ecuación 1 fue desarrollada por Lamm et al. (1999) citado por Ng y Sayed (2004), la cual se añadió, basados en el modelo de Morrall y Talarico (1994), en la ecuación 2.

2.2 Parámetro basado en la fricción

La demanda de fricción lateral aumenta conforme aumentamos la velocidad de operación, a tal grado que podemos superar la fricción de proyecto y con ello provocar un accidente.

Este parámetro está hecho para determinar la diferencia entre la fricción de demanda y proyecto. Para el cálculo de la consistencia mediante este parámetro Lamm et al. (1999) citado por Ng y Sayed (2004) determinaron las ecuaciones 3, 4 y 5 las cuales se muestra a continuación.

$$\Delta f_R = f_R - f_{RD} \qquad \text{Ecuación 3}$$

$$f_R = 0.22 - 1.79x10^{-3}\ V_d + 0.56x10^{-5}\ V_d^2 \qquad \text{Ecuación 4}$$

$$f_{RD} = \frac{V_{85}^2}{127R} - e$$ Ecuación 5

Donde:

f_R = Fricción lateral supuesta

f_{RD} = Fricción lateral exigida

V_D = Velocidad de proyecto (km/hr)

e = sobreelevación

2.3 Parámetro basado en la carga de trabajo del conductor

Este parámetro se refiere, de acuerdo con Messer (1980), al tiempo en el que el conductor debe realizar una tarea de conducción, reaccionando a todos aquellos cambios que se presenten en la carretera. La carga de trabajo aumenta conforme aumenta la complejidad de la geometría de la carretera, también la carga de trabajo aumenta conforme aumenta la velocidad y se reduce la distancia visual. En este sentido, Castro et al. (2005) mencionan que este factor se expresa de acuerdo con la demanda visual que depende de si el conductor conoce o no el camino de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$VD_{LU} = 0.173 + \frac{43}{R}$$ Ecuación 6

$$VD_{LF} = 0.198 + \frac{29.2}{R}$$ Ecuación 7

Donde:

VD_{LU} = Demanda visual de conductores de una ruta no conocida

VD_{LF} = Demanda visual de conductores de una ruta conocida

R = Radio de la curva horizontal

2.4 Parámetro basado en la velocidad de aproximación en curvas

McFadden y Eleftediarou (2000) desarrollaron el concepto llamado Reducción Máxima de la Velocidad de Operación (85MSR, 85th *percentile Maximum Speed Reduction*), en el cual se considera la diferencia entre la velocidad de operación en la tangente de entrada a la curva y la velocidad al centro de la curva, además considera el vínculo entre estas dos velocidades y su covarianza. Esto se puede ver en la ecuación 8 mostrada a continuación.

$$85MSR = \mu_1 - \mu_2 + Z_{0.85}\, x \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2COV(V_1, V_2)}$$ Ecuación 8

Donde:

COV = Término de covarianza que refleja la asociación lineal (correlación) en velocidades entre elementos sucesivos de la carretera.

μ_1,μ_2 = Velocidades promedios en el centro de la curva

σ = Desviación estándar de las velocidades

$Z_{0.85}$ = Valor del percentil 85 de la distribución normal estandarizada

3. Criterios de evaluación de la consistencia

Los parámetros de consistencia descritos anteriormente tienen relación con los criterios de evaluación de la consistencia del alineamiento horizontal que veremos a continuación.

3.1 Criterios de evaluación de consistencia de Lamm et al. (1986, 1987, 1991)

Lamm y sus colaboradores, propusieron para los tres criterios, diferentes variables para evaluar la consistencia, con base en un análisis de correlación entre la tasa de ocurrencia de accidentes y: la tasa de cambio de curvatura (CCR) (Lamm et al., 1986), la velocidad de operación (Lamm y Choveiri, 1987) y la fricción lateral (Lamm et al., 1991).

Lamm et al. (1986, 1991) realizaron estudios en Estados Unidos y Alemania, en donde obtuvieron bases de datos de accidentes que, siguiendo una serie de pasos, incluyendo un análisis de conglomerados, lograron calcular la tasa media de accidentes para distintos rangos de CCR. En donde definieron los siguientes valores críticos de CCR:

a) CCR < 180 g/km (162°), en donde el riesgo de accidentes resultó ser el más bajo.

b) 180 g/km < CCR < 360 g/km (162° < CCR < 324°), en donde la tasa media de accidentes resultó entre dos y tres veces mayor al caso del inciso a).

c) CCR > 360 g/km (> 324°), en donde la tasa media de accidentes resultó ser de cuatro a cinco veces mayor al caso del inciso a).

Con los valores críticos definidos anteriormente, se obtuvieron los criterios mostrados en la Tabla 1. De acuerdo con Echaveguren et al. (2009) la calificación “Bueno”, se refiere a un proyecto geométrico consistente, que no requiere modificaciones en su diseño. La calificación “Regular”, se refiere a que se deben realizar ciertas mejoras que serán de importancia o no dependiendo de la cercanía del resultado hacia la calificación de “bueno” o “malo”. Finalmente, la calificación “malo” requiere un rediseño del proyecto geométrico, ya que no cumple con las condiciones de seguridad de operación.

Tabla 1. *Criterios de Consistencia de Lamm et al. (1986, 1991).*

Criterio	Elemento geométrico	Intervalo de Tasa de Cambio de curvatura (CCR)	Criterio de consistencia	Calificación del Diseño
I	Curvas simples	$CCR_i \leq 180$ g/km	$IC_I \leq 10$ (km/h)	Bueno
		$180 \leq CCR_i \leq 360$ g/km	$10 \leq IC_I \leq 20$ (km/h)	Regular
		$CCR_i > 360$ g/km	$IC_I > 20$ (km/h)	Malo
II	Curvas Sucesivas	$\lvert CCR_i - CCR_{i+1} \rvert \leq 180$ g/km	$IC_{II} \leq 10$ (km/h)	Bueno
		$180 \leq \lvert CCR_i - CCR_{i+1} \rvert \leq 360$ g/km	$10 \leq IC_{II} \leq 20$ (km/h)	Regular
		$\lvert CCR_i - CCR_{i+1} \rvert > 360$ g/km	$IC_{II} > 20$ (km/h)	Malo

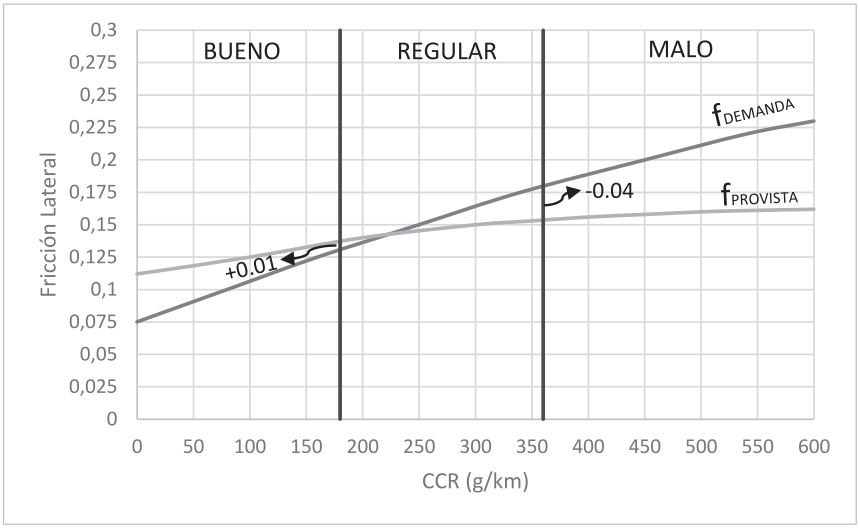
Tabla 1 (Cont.)

III	Curvas Simples	$CCR_i \leq 180$ g/km	$IC_{III} > + 0{,}01$	Bueno
		$180 \leq CCR_i \leq 360$ g/km	$-0{,}04 < IC_{III} < + 0{,}01$	Regular
		$CCR_i > 360$ g/km	$IC_{III} < - 0{,}04$	Malo

Fuente: Echaveguren et al. (2009).

Posteriormente, en Lamm et al. (1991), desarrollaron la Figura 1 (adaptada) que se muestra a continuación, donde se relaciona la evaluación de la fricción lateral con la tasa de cambio de curvatura. Esta gráfica resulta de gran apoyo para evaluar la consistencia con respecto a la fricción lateral. Sin embargo, lo recomendable es que, en cada país o región se desarrollen modelos como este, conforme a las estadísticas de la región para poder obtener un resultado más cercano a la realidad.

Figura 1. Variación de la fricción lateral en función de la CCR



Fuente: Lamm et al. (1991).

El método de Lamm y Choueiri (1987), mostrado en la Tabla 2, es uno de los más usados, en donde la consistencia se mide como la diferencia entre la velocidad de proyecto y la velocidad de operación (V_{85}) en un punto dado de la vía, a pesar de sus años, este método sigue vigente y ha sido empleado por diversos autores e instituciones (FHWA 2004; Sánchez y Castro 2003; García et al., 2012). El método fue desarrollado a partir de que el cambio de velocidad máximo permitido está entre 10 km/h (de acuerdo con el manual de diseño de carreteras alemán) y 20 km/h (derivado del manual de diseño de carreteras suizo). Con ello, Lamm y Choueiri (1987) decidieron que V_{85}<10 km/h es un diseño consistente, entre 10 y 20 km/h regular y V_{85}>20 km/h es un diseño inconsistente y se requiere un rediseño. Es importante mencionar que la V_{85} se considera constante a lo largo de la curva.

Tabla 2. *Clasificación de la consistencia del trazado.*

Intervalo	Clasificación de la consistencia
Comparando con la velocidad de diseño (V_d)	
V_{85}-V_d ≤ 10km/h	Buena
10km/h< V_{85}-V_d ≤ 20km/h	Regular
20km/h < V_{85}-V_d	Mala
Comparando velocidad entre elementos consecutivos	
ΔV_{85} ≤ 10 km/h	Buena
10 km/h > ΔV_{85} ≤ 20 km/h	Regular
ΔV_{85} > 20 km/h	Mala

V_{85}: velocidad de operación en un punto dado de la vía (km/h)
V_d: velocidad de diseño (km/h)
ΔV_{85}: diferencia de velocidad de operación entre dos elementos consecutivos (km/h)

Fuente: Lamm y Choueiri (1987) citado por García et al. (2012)

3.2 Criterios de evaluación de consistencia de Polus y Dagan (1987)

El criterio de Polus y Dagan (1987), a pesar de que puede medir la consistencia mediante la diferencia de radios de curvatura, es poco usado debido a que las calificaciones de consistencia del trazado están basadas en el juicio experto.

Los autores plantean 5 principios específicos acerca de la consistencia en el diseño, las cuales se encuentran en orden (de mayor calificación de consistencia a menor calificación de consistencia):

1. Para carreteras que constan de curvas con radios iguales solamente, cuanto mayor es el radio de la curva, mayor es la consistencia.
2. Para carreteras con diferentes curvas, la consistencia es mayor cuando la similitud entre las curvas es mayor. Esto debido a que la consistencia es mayor cuando todos los radios son idénticos.
3. Las tangentes situadas entre curvas disminuyen la consistencia; por ejemplo, si tenemos un tramo de la carretera solo con curvas sucesivas, la consistencia será mayor que si lo comparamos con un tramo de carretera que tenga tangentes entre las curvas.
4. Cuando la carretera consta de curvas y tangentes, cuanto más largas son las tangentes, menor es la consistencia.
5. La consistencia es menor cuando las curvas aparecen en pares de radios iguales, en lugar de radios que se alternan sucesivamente.

3.2 Criterios de evaluación de consistencia de Polus y Mattar-Habib (2004)

El método de Polus y Mattar-Habib (2004) está basado en la Ecuación 9 que se muestra a continuación:

$$C = A * e^{-B*[Ra*(\frac{\sigma}{3.6})]}$$ Ecuación 9

Donde:

C = consistencia en el diseño

Ra = área relativa delimitada entre el perfil de velocidad y la velocidad media ponderada (m/s)

σ = Desviación estándar de las velocidades de operación a lo largo del segmento de la carretera (km/h)

A, B = Constantes

Para calibrar las dos constantes fue necesario determinar dos valores de consistencia "conocidos". La asignación de valores preliminares de 10 y 1 para *A* y *B*, respectivamente, y los análisis de sensibilidad posteriores, mostraron que *C* era mayor que 2 en un diseño consistente, pero menor que 1 en un diseño inconsistente. Los valores de *C* entre 1 y 2 eran típicos de un diseño promedio aceptable. A su vez, el análisis de los valores de las medidas de *Ra* y puede proporcionar una estimación inicial de la calidad de consistencia del diseño, todo esto se muestra en manera de resumen en la Tabla 3.

Las constantes *A* y *B* están calibradas para carreteras con valores de consistencia previamente conocidos, por lo cual representan sólo casos particulares.

Tabla 3. *Variables para la determinación de la consistencia de la calidad de diseño, por medidas individuales.*

Medida de consistencia	Calidad de consistencia en el diseño		
	Bueno	Aceptable	Malo
Área Relativa (*Ra*)	$Ra \leq 1$ (m/s)	$1 < Ra \leq 2$ (m/s)	$Ra > 2$ (m/s)
Desviación estándar (	$\sigma \leq 5$ (km/h)	$5 < \sigma \leq 10$ (km/h)	σ 10 (km/h)
Índice de consistencia (*C*)	*C > 2* (m/s)	*1 < C ≤ 2* (m/s)	$C \leq 1$ (m/s)

Fuente: Polus y Mattar-Habib (2004)

3.3 Criterios de velocidad de aproximación a curvas horizontales

Fitzpatrick et al. (2000) desarrollaron dos criterios para evaluar la consistencia de curvas horizontales con base en la deceleración, desde la tangente de entrada hasta llegar a la curva circular, y la aceleración del vehículo a la salida de la curva. Dichos criterios son mostrados a continuación, véase Tabla 4.

Tabla 4. *Criterios de consistencia de Fitzpatrick et al. (2000)*

Deceleración (m/s^2)	Calificación del diseño	Aceleración (m/s^2)
1 ≤ D ≤ 1.48	Bueno	0.54 ≤ A ≤ 0.89
1.48 < D ≤ 2.0	Aceptable	0.89 < A ≤ 1.25
D > 2.0	Malo	A > 1.25

Fuente: Fitzpatrick et al. (2000)

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A lo largo de los años, la normativa de proyecto geométrico de carreteras ha estado en constante evolución, mejorando de esta forma la seguridad y confort del usuario.

Por ello, se creó el concepto de consistencia en el diseño para que el proyectista pueda evaluar la calidad de su propio diseño y, así, poder ofrecerle al usuario una carretera más segura y más apegada a sus expectativas. Es importante mencionar que este concepto solo debe considerarse como apoyo a la normativa de proyecto geométrico y no debe considerarse como un sustituto. Esto debido a que las calificaciones de los criterios de evaluación; “Bueno”, “Regular” y “Malo” fueron determinados con base en estudios en países específicos y estos datos pueden variar de un país a otro. Esto nos lleva a la necesidad de que en cada país debe existir modelos de predicción de velocidad de operación, ya sean propios o adaptados y calibrados de otros países; para con ello poder predecir, desde el diseño, la velocidad a la que circularán los conductores y con esto evaluar la consistencia en el diseño.

Uno de los problemas encontrados fue que todos los criterios de evaluación de la consistencia en el diseño están correlacionados a accidentes de tránsito con los diferentes segmentos geométricos de las carreteras y para poder calibrar un criterio de evaluación localmente, necesitaríamos tener una base de datos de accidentes de calidad y ~~en~~ cantidad. Frecuentemente, esto no es posible, ya que en muchos países los reportes de los accidentes no se registran de manera completa (relacionándolos con los segmentos de la carretera) o en muchas ocasiones no se registran, lo que dificulta la calibración. De aquí parte la necesidad de buscar una nueva forma de desarrollar un método alternativo, el cual no use los accidentes de tránsito como base.

A pesar de que existen diversas formas de evaluar la consistencia, todos los métodos tienen el mismo fin, tratar de medir las expectativas de los conductores. Esto debido a que es la mejor variable subjetiva para entender cómo los conductores perciben el trazo de una carretera y cómo actúan ante las diferentes configuraciones geométricas.

La bibliografía existente, a pesar de que es bastante extensa, sigue siendo insuficiente, ya que, actualmente, no existe un modelo continuo donde se incluyan todos los elementos del trazado como planimetría y altimetría.

AGRADECIMIENTOS

Darinel Galindo Aguilar agradece al CONACYT por el apoyo económico otorgado (CVU CONACYT: 1032392).

REFERENCIAS

AASHTO (2004). *A policy on geometric design of highways and streets*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.

Castro, M., Pardillo-Mayora, J. M., & Sanchez, J. F. (2005). Alignment indices as a tool to evaluate safety and design consistency in two lane rural roads: *3rd International Symposium on Highway Geometric Design*, on June 29 – July 2 of 2005, Chicago, Estados Unidos.

Echaveguren, T., Vargas-Tejeda, S., Altamira, A., & Riveros, D. (2009). Criterios para el análisis de consistencia del diseño geométrico: velocidad, aceleración, visibilidad y confiabilidad. *In Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*, 14-18 de septiembre 2009, Artículo A-59.

Federal Highway Administration (FHWA) (2004). *HSDM Design Consistency Module*. Engineer's Manual, Washington, D.C., EE.UU.

Fitzpatrick, K. (2000). *Evaluation of design consistency methods for two-lane rural highways: executive summary* (No. FHWA-RD-99-173). United States. Federal Highway Administration.

Fuller, R. & Santos, J.A. (2002). Human Factors for Highway Engineers, *The Netherlands: Pergamon*, Amsterdam.

Garcia, A., Llopis-Castello, D., Pérez-Zuriaga, A. M., & Camacho-Torregrosa, F. J. (2013). Homogeneous road segment identification based on inertial operating speed. In *Proc., 92nd Annual Meeting on Transportation Research Board*. January 13-17, 2013. No. 13-3545.

García, R. A., Martínez, D. E., & Díaz, E. E. (2012). Modelos de perfil de velocidad para evaluación de consistencia del trazado en carreteras de la provincia de Villa Clara, Cuba. *Revista ingeniería de construcción*, 27(2), 71-82.

Glennon, J. C., & Harwood, D. W. (1978). Highway design consistency and systematic design related to highway safety. *Transportation Research Record*, 681, 77-88.

Jacob, A., & Anjaneyulu, M. V. L. R. (2013). Operating speed of different classes of vehicles at horizontal curves on two-lane rural highways. *Journal of Transportation Engineering*, 139(3), 287-294.

Jahn, G., Oehme, A., Krems, J. F., & Gelau, C. (2005). Peripheral detection as a workload measure in driving: Effects of traffic complexity and route guidance system use in a driving study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(3), 255-275.

Krammes, R. A. (1997). Interactive highway safety design model: Design consistency. *Public Roads*, 61(2), 47-51.

Lamm, R., & Choueiri, E. M. (1987). Recommendations for evaluating horizontal design consistency based on investigations in the state of New York. *Transportation Research Record*, 1122(68), e78.

Lamm, R., Choueiri, E. M., & Mailaender, T. (1991). Side friction demand versus side friction assumed for curve design on two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, 1303, 11-21.

Lamm, R., Hayward, J. C., & Cargin, J. G. (1986). Comparison of different procedures for evaluating speed consistency. *Transportation Research Record*, (1100).

Makishita, H., & Matsunaga, K. (2008). Differences of drivers' reaction times according to age and mental workload. *Accident Analysis & Prevention*, 40(2), 567-575.

McFadden, J., & Elefteriadou, L. (2000). Evaluating horizontal alignment design consistency of two-lane rural highways: Development of new procedure. *Transportation Research Record*, 1737(1), 9-17.

McLean, J. (1981). Driver speed behaviour and rural road alignment design. *Traffic Engineering & Control*, 22(HS-032 471).

Messer, C. J. (1980). Methodology for Evaluating Geometric Design Consistency. *Transportation Research Record*, 757, 7-14.

Morrall, J. F., & Talarico, R. J. (1994). Side friction demanded and margins of safety on horizontal curves. *Transportation Research Record*, 1435, 145.

Ng, J. C., & Sayed, T. (2004). Effect of geometric design consistency on road safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 218-227.

Polus, A., & Dagan, D. (1987). Models for evaluating the consistency of highway alignment. *Transportation Research Record*, 1122, 47-56.

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

Radimsky, M., Matuszkova, R., & Budik, O. (2016). Relationship between horizontal curves design and accident rate. *Jurnal Teknologi*, 78(5-2).

Russo, F., Mauro, R., & Dell'Acqua, G. (2012). Rural highway design consistency evaluation model. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 952-960.

Sánchez, J., & Castro, M. (2003). Procedimientos de evaluación de la consistencia del trazado de las carreteras: IHSDM. *Rutas: Revista de la Asociación Técnica de Carreteras*, 96, 5-14.

Sebastián, O., & Del hoyo, M. A. (2002). *La carga mental de trabajo*. Madrid, España: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

Solminihac, H. E., Echaveguren, T., & Vargas, S. (2007). Friction reliability criteria applied to horizontal curve design of low-volume roads. *Transportation research record*, 1989(1), 138-147.

Stamatiadis, N. (2005). Context-sensitive design: Issues with design elements. *Journal of transportation engineering*, 131(5), 374-378.

Van der Horst, R. (2004). Occlusion as a measure for visual workload: an overview of TNO occlusion research in car driving. *Applied ergonomics*, 35(3), 189-196.