

Análisis de Consistencia del Diseño en Rutas Nacionales de La Provincia de Córdoba. Analysis of Desing Consistency on National Routes in the Province of Cordoba.

Gustavo Vanoli ^{1,*}, Mauro Tartabini ¹, Paula Marchesini ¹, Santiago Grenada ¹, Rodolfo Freire ¹.

¹Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas, Físicas y Naturales, Córdoba, Argentina.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del
artículo:

14-11-2023

Aceptado

16-04-2024

Publicado

25-08-2024

Palabras Clave:

Velocidad

Diseño

Consistencia

Seguridad

Article history:

Received

14-11-2023

Accepted

16-04-2024

Available

25-08-2024

Keywords:

Speed

Desing

Consistency

Safety

Resumen

En base a información de tránsito y velocidades provistas por DNV (estaciones permanentes y censos de cobertura del periodo 2010-2017 de la Dirección Nacional de Vialidad), se seleccionaron 9 tramos de rutas que atraviesan la provincia de Córdoba (Argentina), sobre los cuales se revisó la consistencia del diseño, en relación con las expectativas de velocidad y trayectoria de los conductores. Para ello se determinó la diferencia entre la velocidad esperada (percentil 85), la velocidad de diseño (Vd o directriz) y la reducción esperada de V85 entre distintos elementos del alineamiento horizontal. El análisis se realizó con el programa IHSDM (2021) v17.0.0 – DCM v7.0.0 (Interactive Highway Safety Design Model – Design Consistency Module) de la Federal Highway Administration (FHWA). La geometría de los tramos analizados se corresponde con una Categoría II: $1500 < \text{TMDA} < 5000$, según DNV (excepto un tramo con 6.560 veh/día), en terreno llano ($i \leq 3\%$). Se observó para elementos aislados (Criterio I) una gran variabilidad en la estimación de V85 para curvas horizontales con radios menores al mínimo absoluto según norma de diseño DNV. Se detectó además que la mayor diferencia de velocidades respecto a V85 se obtiene considerando la velocidad de diseño (Vd) según norma (120 km/h), resultando menor esta diferencia cuando se compara con la velocidad máxima señalizada in-situ. Respecto del análisis para elementos sucesivos (recta-curva, Criterio II) no se observaron relaciones evidentes entre bajas y/o medianas variaciones de velocidad según radios de curvas horizontales, ya sea considerando Vd o velocidad máxima señalizada.

Abstract

Based on traffic information and speeds provided by DNV (permanent stations and coverage censuses from the 2010-2017 period of la Dirección Nacional de Vialidad), 9 road segments crossing the province of Córdoba (Argentina) were selected, on which the design consistency was reviewed in relation to drivers' speed and trajectory expectations. To do this, the difference between the expected speed (85th percentile), the design speed (Vd or guideline), and the expected reduction in V85 between different elements of the horizontal alignment was determined. The analysis was conducted using the IHSDM (2021) v17.0.0 – DCM v7.0.0 (Interactive Highway Safety Design Model – Design Consistency Module) from the Federal Highway Administration (FHWA). The geometry of the analyzed sections corresponds to Category II: $1500 < \text{TMDA} < 5000$, according to DNV (except for one section with 6,560 veh/day), on flat terrain ($i \leq 3\%$). For isolated elements (Criterion I), there was significant variability in the V85 estimate for horizontal curves with radii smaller than the absolute minimum according to DNV design standards. It was also found that the greatest speed differences with respect to V85 occurred when comparing the design speed (Vd) per standard (120 km/h), with smaller differences observed when comparing with the in-situ posted maximum speed. Regarding the analysis for successive elements (straight-curve, Criterion II), no clear relationships were found between low and/or medium speed variations based on horizontal curve radii, whether considering Vd or posted maximum speed.

* Corresponding author at: Gustavo D. Vanoli, Universidad Nacioal de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Física, Física y Naturales, Av. Vélez Sarsfield 1600, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina. E-mail address: gustabovanoli@unc.edu.ar

RIOC

journal homepage: <https://rioc.ufro.cl/index.php/rioc/index>

Vol. 12, no. 02, pp. 1-11, Agosto 2024

1. Introducción.

El tránsito podría definirse como la materialización físico-espacial del movimiento de vehículos y personas, resultante del traslado de personas y bienes dentro de un área (rural o urbana) utilizando el medio de transporte carretero. La manifestación dinámica del tránsito es la circulación, que queda identificada a través de la velocidad.

Una falla en cualquiera de los componentes del sistema vial produce una discontinuidad en el mismo cuya consecuencia es la disminución de los márgenes de seguridad, hasta el extremo de ocurrir un accidente.

La velocidad que desarrollan los vehículos en un camino es un indicador que permite calificar el funcionamiento de la circulación, pero dicha velocidad no es continua; fluctúa según capacidad, cultura y comportamiento del conductor, capacidades de operación del vehículo, características topográficas del camino y su entorno, condiciones climáticas, presencia de otros vehículos, limitaciones legales de velocidad, límites de velocidad señalizados, entre otros.

La relación entre el diseño vial y la velocidad es interactiva, pues el proyectista diseña los elementos del camino mediante la velocidad prevista a la cual se lo usará, estudiando los costos de construcción de los alineamientos alternativos para armonizarlos con la velocidad de viaje deseada. Pero estimar estas velocidades “a priori” representa una tarea poco sencilla para el equipo de proyectistas dada la falta de mediciones de velocidades reales. El estadístico más usado para representar la velocidad de operación es el percentil 85 (V85) de la distribución de velocidades de operación (Gibreel et al, 1999).

Teniendo en cuenta que las rutas de dos trochas indivisas abundan en nuestro país y sus niveles de seguridad no son óptimos, se hizo especial hincapié en las velocidades de operación de los vehículos buscando sentar una base de referencia para la gestión de la velocidad.

Con estos valores de velocidad se evalúa la consistencia del diseño en los tramos seleccionados. Se entiende por Consistencia del Diseño a la condición bajo la cual la geometría de una vía se encuentra en armonía con las expectativas de los conductores y con sus aptitudes para guiar y controlar un vehículo. Numerosos estudios (Lamm et al, 1995) han mostrado que existe correlación entre la probabilidad de ocurrencia de accidentes y la diferencia entre velocidad de diseño y velocidad de operación (V85), consistencia de elementos simples, y/o la diferencia de velocidad de circulación entre curvas sucesivas y en elementos aislados del trazado (consistencia de elementos sucesivos). La Consistencia

del Diseño se evalúa a través del Módulo de Consistencia del Diseño (DCM) del programa IHSDM (2021) v 17.0.0 (Modelo Interactivo de Diseño Seguro de Caminos - Interactive Highway Safety Design Model) que chequea la coherencia del diseño en relación con las expectativas de velocidad y trayectoria de los conductores.

Un objetivo del presente trabajo es identificar atributos comunes en las rutas nacionales de la Provincia de Córdoba (Argentina), con el fin de establecer patrones de caracterización que permitan determinar su consistencia, con miras a su utilización para el diseño geométrico y la seguridad vial. Es decir, proveer a los proyectistas de valores de referencia cualitativos para que se puedan alcanzar diseños consistentes y seguros.

La geometría de los tramos analizados se obtuvieron principalmente de imágenes satelitales de alta resolución (Easa et al., 2007) en forma rápida, económica y eventualmente complementando dicha información con un modelo digital de terreno (MDT).

2. Metodología.

2.1. Tramos analizados y seleccionados.

De los 14 tramos analizados con información disponible de la DNV, sólo se consideraron 9 para el análisis de velocidades, debido a que dos de los tramos se corresponden con autopistas (Ballesteros y James Craick en RN1V09) y otros 3 sitios presentaban valores que podrían ser atípicos y/o incompletos por tratarse de Travesías Urbanas o zonas periurbanas (Sampacho en RN8, Villa Giardino y Empalme Tanti en RN38).

En la Tabla 1 se resumen los nueve tramos seleccionados, indicando la progresiva de la estación de medición, la longitud de cada uno, su TMDA al año 2018 y las diferentes velocidades consideradas para verificar la consistencia de diseño: Velocidad Máxima (según señales verticales in-situ), Velocidad de Diseño (o directriz, compatible con los parámetros geométricos observados en la vía) y Velocidad Deseada (que desarrollan los conductores cuando no hay restricciones de alineamiento horizontal ni vertical), obtenida de los puestos de medición de la DNV.

Tabla 1. Listado de tramos analizados para consistencia de diseño.

Nº	Localidad	Ruta	Est	Prog Ini	Prog Fin	Long Km	TMDA 2018	Anch calz (m)	Anch banq (m)	V max km/h	Vd km/h	Vdes km/h
1	V. Mackenna	RN7	585	540	586	46	3013	6,70	3,00	110	120	109
2	Reducción	RN8	564	500	595	95	3920	6,70	3,00	110	120	128
3	Simbolar	RN9N	812	802	826	24	3403	6,70	3,00	110	120	114
4	Oliva	RNV09	517	502	552	50	2541	7,30	3,00	110	120	118
5	Morrison	RNV09	603	562	608	47	2445	7,30	3,00	110	120	119
6	Bº Don Justiniano	RN19	234	224	280	56	6560	6,70	2,00	80	120	114
7	Aº El Gato	RN35	669	666	677	11	3983	6,70	3,00	80	120	102
8	Quilino	RN60	852	851	929	78	3820	6,70	3,00	110	120	119
9	Laspur	RN158	69	0	76	76	3150	6,70	3,00	110	120	112

En la Figura 1 se observa la ubicación de los 9 tramos descritos previamente, así como la ubicación de los puntos de censo (DNV) de donde se obtuvo la información de tránsito y V85.

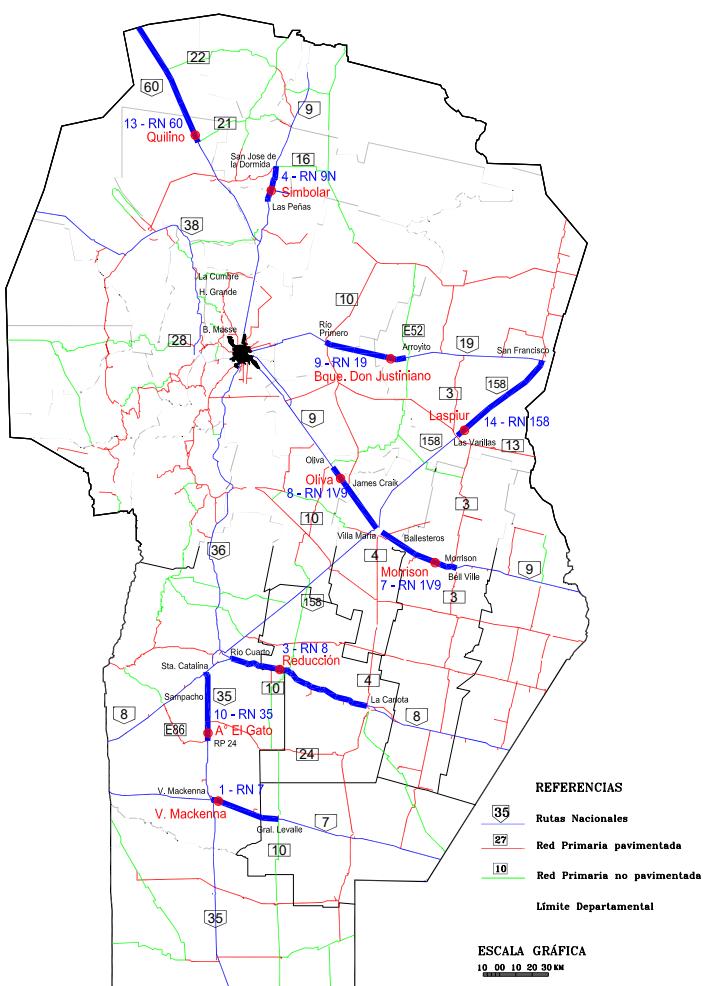


Figura 1. Ubicación de tramos y estaciones censales para análisis de consistencia.

2.2. Caracterización geométrica de la vía.

Para el estudio del comportamiento de los conductores no es suficiente con obtener datos de la velocidad desarrollada por los mismos, sino que además es necesario relacionarla con el trazado de la vía. Para ello, se precisa disponer de su geometría, que en la mayoría de los casos no se encuentra disponible, por lo que se ha de adoptar una metodología para su obtención.

Respecto de las características geométricas del camino que se desea analizar, la Tabla 2 muestra los parámetros utilizados para los modelos de análisis de consistencia del diseño en planta y altimetría (Vargas y Vanegas, 2018), que resultan de gran importancia debido a su relación con la velocidad de operación.

Tabla 2. Parámetros del diseño a considerar para análisis de consistencia.

Parámetro	Símbolo	Unidades
Radio	R	m
Longitud de Curva	Lc	m
Horizontal		
Longitud entre	Lt	m
Tangencia		
Pendiente Longitudinal	%	%

Cabe destacar que no se utilizaron datos geométricos como longitud de espirales (en curvas horizontales) y longitud de curva vertical, ya que resultan de difícil determinación en función de la información de base disponible (modelos de elevaciones sobre bases digitales).

Según bibliografía consultada, se han llevado a cabo distintas investigaciones cuyo fin ha sido la restitución de la geometría de la vía, utilizando principalmente alguna de estas metodologías:

2.2.1. Imágenes de satélite de alta resolución.

Destaca la realizada por Easa et al. (2007) que buscó generar mapas de carreteras digitales de forma rápida y económica a

partir de imágenes de satélite de alta resolución. Para ello presentó una metodología para obtener la alineación horizontal de una carretera utilizando imágenes IKONOS. A partir de estas imágenes se obtiene la restitución de las curvas horizontales simples y curvas en S sin recta intermedia y mediante la unión de estas con líneas rectas se obtiene la geometría. Los resultados mostraron que el método propuesto convergía en todos los casos y podía ser utilizado para la restitución de curvas horizontales. Sin embargo, en su estudio no tuvieron en cuenta las curvas de transición.

2.2.2. Utilización de datos procedentes de GPS.

Imran et al. (2006) han propuesto una metodología para la restitución de la alineación horizontal de una carretera basándose en las trayectorias de vehículos equipados con GPS de alta precisión. Para ello, se tomaron datos con un vehículo equipado con un GPS con un intervalo de 0,1 segundos bajo diferentes condiciones de velocidad (80, 90 y 100 km/h) en una carretera convencional, en ambos sentidos de circulación, lo que suponen 6 recorridos.

A partir de los datos estimaron en primer lugar los tramos rectos de la vía y, posteriormente, las curvas como tangente a dos rectas, como el mejor ajuste al 50% de los puntos que no pertenecían a las rectas. Por último, a partir de ello, estimaron la existencia o no de clotoides. Los resultados de la aplicación de la metodología fueron comparados con las características geométricas reales de la carretera, concluyendo que se trataba de una metodología para la obtención de la geometría de una vía de forma rápida, fiable y con un relativo bajo costo.

Castro M. et al. (2006) presentaron un procedimiento para obtener la definición geométrica de carreteras convencionales. El método está basado en la obtención de datos de la carretera con un intervalo de 1 segundo mediante un receptor GPS instalado en un vehículo circulando a 80 km/h y el consiguiente procesamiento de esta información. Se eligió esta velocidad con el fin de no suponer un obstáculo para el resto de vehículos, por lo que se tomaron datos cada 20 m aproximadamente. El vehículo realizó el recorrido en los dos sentidos de circulación.

Los datos tomados por el GPS fueron corregidos de diferentes formas y los puntos del eje de la carretera estimados por un algoritmo de cálculo que desarrollaron basado en la simetría de los dos recorridos realizados por el vehículo. Para encontrar los distintos puntos que forman el eje de la carretera el procedimiento consistió en, para cada punto de un recorrido, encontrar el punto del recorrido en sentido contrario más próximo a aquél y calcular el punto medio entre ambos. La restitución de la geometría resultado del estudio fue comparada con el estado de alineaciones del proyecto de construcción de

dicha carretera, concluyendo que el 71 % de las diferencias entre los puntos reales y los estimados eran inferiores a 0,50 m y que la máxima distancia y la distancia media eran de 1,00 y 0,40 m respectivamente.

2.2.3. Modelo digital de terreno (MDT).

Los trabajos de modelación geométrica del camino pueden desarrollarse a partir de diferentes fuentes de información geográfica, tales como cartografías digitales obtenidas por restitución de vuelos fotogramétricos, trabajos topográficos de campo, levantamientos masivos obtenidos por escaneado láser terrestre o aéreo, o relevamiento mediante utilización de GPS a lo largo del tramo analizado. La información geográfica de partida puede obtenerse de datos LiDAR procedentes del Instituto Geográfico Nacional (IGN) o de otras bases de datos mundiales de modelos digitales de elevaciones.

2.3. Criterio adoptado.

Para la determinación de las características geométricas del trazado de los tramos de interés, se han empleado dos bases de datos principales:

- Imágenes Satelitales de distintas fuentes (Google Earth, Bing, Global Mapper)
- Modelo Digital de Elevaciones de distintas fuentes (IGN, Google Earth, Global Mapper)

Se usaron distintas fuentes porque según la ubicación de los tramos, los niveles de precisión difieren y se ha adoptado la de mejor resolución para cada caso. A partir de los niveles de precisión de esas bases de datos, se determinaron los siguientes componentes planialtimétricos:

- Planimetría: se determinaron la poligonal de base y las curvas circulares simples que mejor se adapten a las imágenes y modelos LIDAR empleados. Para los peraltas, se han empleado valores recomendados por norma para la combinación de velocidad directriz y radio en cada caso.
- Altimetría: debido a los bajos niveles de precisión, sólo se han determinado las poligonales de base en altitud, obteniendo las combinaciones de longitud y pendiente longitudinal en cada caso. Asimismo, cabe destacar que el módulo del software empleado que calcula las velocidades de operación no tiene en cuenta los valores del parámetro K de las curvas verticales.

Verificando los datos de TMDA (2018) y los gradientes de los tramos analizados, se concluye que según Tabla 1 de la DNV (Características de Diseño Geométrico para Caminos Rurales), los mismos se corresponden con un camino Categoría II ($1500 < TMDA < 5000$) en terreno llano ($i_{max} = 3\%$) con una velocidad de

diseño (Vd) de 120 km/h. La única excepción al TMDA lo constituye el Tramo N°9 (RN19) que presenta un valor de 6.560 veh/día, en tanto que ningún tramo supera un gradiente de 2,6% (ubicándose la gran mayoría por debajo del 1%).

Para las curvas horizontales, la Categoría II prevé radios con un mínimo deseable de 900 m y mínimo absoluto de 600 m con peralte máximos de 8%. En gran parte de los tramos se cumplen estos valores (radios mínimos de 600 m y peralte máximos de 6%), excepto en los ingresos a travesías urbanas, en donde se han observados valores de radios entre 100 y 500 m. No obstante, en esos casos se ha mantenido para el análisis la Vd = 120 km/h como referencia, a los efectos de resaltar en los resultados del análisis de consistencia, el diferencial de velocidades entre una recta inmediatamente anterior a una curva horizontal de ingreso a una Travesía Urbana, ya que dicha situación representaría un riesgo potencial de accidente en caso que no se observen en el sitio dispositivos de regulación, para mitigar esa diferencia de velocidades.

2.4. Análisis de consistencia del diseño.

El programa IHSDM evalúa dos medidas de consistencia del diseño, empleando para ello los Criterios I y II de Lamm, por lo que es necesario determinar las velocidades percentil 85.

I. La diferencia entre velocidades percentil 85 estimadas (V85) y velocidad directriz (Vd). Por lo general la V85 estimada es superior a Vd del camino. Serán pasibles de atención, las situaciones puntuales donde se observe marcada diferencia entre ambas velocidades. Con el fin de facilitar su interpretación visual, los rangos de valores para esta medida son agrupados, identificándolos con diferentes colores.

- Condición 1: $0 \text{ km/h} \leq (V85 - V \text{ diseño}) \leq 10 \text{ km/h}$
- Condición 2: $10 \text{ km/h} < (V85 - V \text{ diseño}) \leq 20 \text{ km/h}$
- Condición 3: $20 \text{ km/h} < (V85 - V \text{ diseño})$

Esta agrupación por rangos de valores y la codificación por colores tiene la intención de distinguir entre grandes diferencias y pequeñas diferencias. Esta clasificación permite definir prioridades a la hora de seleccionar atención adicional.

II. Reducción en V85 estimadas, entre elementos de diseño diferentes adyacentes (recta - curva). El modelo verifica las diferencias entre las velocidades en recta y en curva.

- Condición 1: $0 \text{ km/h} \leq (V85 \text{ recta} - V85 \text{ curva}) \leq 10 \text{ km/h}$
- Condición 2: $10 \text{ km/h} < (V85 \text{ recta} - V85 \text{ curva}) \leq 20 \text{ km/h}$
- Condición 3: $20 \text{ km/h} < (V85 \text{ recta} - V85 \text{ curva})$

Tabla 3. Resultados del análisis de consistencia.

Para correr el Módulo de Consistencia del Diseño (DCM), resulta necesario ingresar datos referidos a: alineamiento horizontal (comienzo y fin de tangentes, comienzo y fin de curvas, radios y sentido), alineamiento vertical (pendiente de tangentes), velocidades (Vd, V85) y vehículo tipo. La velocidad de diseño se ha definido a partir del TMDA registrado en cada uno de los tramos (dato oficial de contadores permanentes de tránsito de la DNV) y V85 se ha obtenido también de esos mismos contadores de tránsito. El vehículo tipo considerado fue el liviano "tipo 5", en función de las categorías previstas en el IHSDM.

3. Análisis de resultados.

Se resumen en Tabla 3 los resultados obtenidos para la verificación de consistencia del diseño (módulo DCM) para cada tramo analizado, en función de los dos criterios descritos previamente (destacando en color rojo aquellos radios menores al mínimo absoluto de 600 m):

Nº	Localidad	V85 km/h	Curvas Horizontales		Pendientes del tramo completo		Condición s/ Criterio I V85 - Vd	Condición s/Criterio II		
			R (m)	e (%)	Senti do	i % min	i % máx	(km/h)	Asc (km/h)	Desc (km/h)
1	V. Mackenna	103	2.000	3,0	der	0,00	1,20	17	6	5
		103	2.000	3,0	izq	1,20	2,30	17	6	5
2	Reducción	101	1.000	4,8	der	0,00	0,30	19	27	15
		101	1.000	4,8	izq	0,30	0,50	19	14	14
		101	1.000	4,8	izq	0,50	0,70	19	26	26
		101	1.000	4,8	der			19	27	26
		101	1.000	4,8	izq			19	9	8
		102	1.500	3,6	izq			18	3	2
		102	1.500	3,6	izq			18	3	3
		101	1.000	4,8	der			19	24	23
		102	1.500	3,6	der			18	21	20
		102	1.500	3,6	izq			18	11	11
		101	1.000	4,8	der			19	20	19
		101	1.000	4,8	der			19	19	19
		101	1.000	4,8	izq			19	16	7
		96	400	6,0	der			24	5	5
		96	400	6,0	izq			24	32	17
		81	150	6,0	izq			39	19	19
		81	150	6,0	der			39	34	47
		99	600	6,0	izq			21	29	26
		98	500	6,0	der			22	13	20
		103	2.500	2,4	izq			17	25	24
		103	2.500	2,4	der			17	0	1
3	Simbolar	102	1.500	3,6	izq			18	1	9
		99	600	6,0	der			21	18	16
		99	600	6,0	izq			21	16	28
		103	2.500	3,6	der			17	20	3
		101	1.000	4,8	der			19	3	2
		96	400	6,0	der			24	9	19
		102	1.500	4,8	izq			18	6	24
		105	5.000	2,0	izq	0,00	-0,05	15	9	0
		104	2.500	2,4	der	-0,05	1,78	16	1	6
		103	1.100	4,8	izq	1,78	-1,79	17	6	3
		104	2.500	2,4	izq	-1,79	-0,39	16	3	10
		104	10.000	2,0	der	-0,39	0,17	16	10	0
		104	5.000	2,0	izq	0,17	2,60	16	1	4
		101	1.000	4,8	der	2,60	-1,67	19	5	10
		102	1.500	3,6	izq	-1,67	-0,41	18	10	10
		104	10.000	2,0	der	-0,41		16	10	6
		99	600	6,0	der			21	5	0
		95	350	6,0	izq			25	4	8
		101	800	5,0	der			19	1	14

4	Oliva	69	100	6,0	izq	0,00	-0,21	51	49	2
		69	100	6,0	der	-0,21	-0,28	51	2	49
		91	250	6,0	der			29	27	2
		91	250	6,0	izq			29	3	27
		95	350	6,0	izq			25	23	4
		95	350	6,0	der			25	5	23
		95	350	6,0	der			25	23	3
		95	350	6,0	izq			25	4	23
5	Morrison	102	1.000	4,8	izq	0,00	-0,20	18	17	16
		100	600	6,0	izq			20	19	19
		104	2.000	3,0	der			16	10	18
6	Bº Don Justiniano	101	900	5,2	der	0,00	0,50	19	13	12
		81	150	6,0	der			39	33	5
		81	150	6,0	izq			39	5	33
		81	150	6,0	izq			39	33	17
		91	250	6,0	der			29	2	23
		69	100	6,0	der			51	45	12
		81	150	6,0	izq			39	12	33
		87	200	6,0	izq			33	23	3
		87	200	6,0	der			33	3	27
		81	150	6,0	der			39	33	7
		87	200	6,0	izq			33	6	27
		91	250	6,0	izq			29	23	3
		91	250	6,0	der			29	3	23
		91	250	6,0	der			29	23	4
		91	250	6,0	izq			29	4	23
		91	250	6,0	izq			29	23	3
		91	250	6,0	der			29	3	23
		101	1.000	4,8	der			19	13	12
		101	1.000	4,8	izq			19	13	1
		98	500	6,0	der			22	3	15
7	Aº El Gato	102	1.000	4,8	izq	0,00	1,20	18	1	0
		102	700	5,8	izq	1,20	1,50	18	2	1
		102	700	5,8	der			18	2	1
8	Quilino	105	5.000		izq	0,00	-0,80	15	14	0
		106	10.000		izq	-0,80	-0,50	14	13	0
		106	10.000		izq	-0,50	0,50	14	13	0
		106	10.000		der	0,50	-0,30	14	13	0
		102	1.200	4,4	izq			18	15	1
		104	10.000		der			16	9	3
		106	10.000		izq			14	9	2
		106	10.000		izq			14	13	0
		106	10.000		izq			14	13	0

9	Laspur	100	600	6,0	der	0,00	-2,40	20	22	1
		100	750	5,6	izq	-2,40	1,10	20	2	17
		95	350	6,0	izq	1,10	1,40	25	27	0
		95	350	6,0	der			25	1	27
		104	2.500	2,4	der			16	18	1
		102	1.000	4,8	der			18	3	0
		103	1.000	4,8	izq			17	0	6
		103	1.200	4,4	izq			17	8	1
		101	750	6,0	der			19	2	21
		106	10.000		izq			14	16	16
		95	350	6,0	der			25	27	1
		95	350	6,0	izq			25	2	12
		95	350	6,0	izq			25	12	2
		95	350	6,0	der			25	3	27
		104	10.000		der			16	18	18
		97	450	6,0	der			23	25	9
		88	210	6,0	izq			32	20	22
		98	500	6,0	der			22	7	2
		95	350	6,0	izq			25	4	9
		98	500	6,0	izq			22	5	24
		104	10.000		der			16	17	13
		101	1.000	4,8	izq			19	13	1
		100	800	5,6	der			20	1	5
		100	800	5,6	der			20	4	1
		98	500	6,0	izq			22	2	24
		99	600	6,0	der			21	19	23

Se indican en la tabla anterior los valores de pendientes observadas en cada tramo (atento los datos de entrada necesarios para IHSDM), las cuales resultan $\leq 2,6\%$. Analizando la altimetría de los tramos, según progresivado en sentido ascendente, se observa que:

- El Gato, Don Justiniano, Reducción y Mackenna: con pendiente ascendente predominante.
- Morrison, Oliva y Quilino: con pendiente descendente predominante.
- Laspur y Simbolar: con pendientes ascendentes y descendentes según sector considerado.

En función de los resultados expresados previamente, cabe destacar las siguientes consideraciones:

RN7 – Vicuña Mackenna: En el tramo de 46 km hay solo 2 curvas horizontales con radio de 2.000 m, registrándose para Criterio I: Condición 2 y para Criterio II: Condición 1, en ambas. Se observa que V85 (103 km/h) resulta muy similar a la velocidad deseada (109 km/h) obtenida de un contador de la DNV ubicado en el tramo (prog. 585). Asimismo, la diferencia entre V85 de recta y curva resulta adecuada (entre 6 y 5 km/h según sentido de análisis), por lo que el diseño se considera consistente.

RN8 – Reducción: En el tramo de 95 km hay un total de 28 curvas horizontales: 6 con radios debajo del mínimo absoluto de 600 m (dos de 150, tres de 400 y una de 500 m). En la mayoría de curvas se observa para Criterio I: Condición 2 (excepto Condición 3 para curvas $R < 600$ m).

Para Criterio II: Condición 3 prácticamente en coincidencia con las anteriores, aunque también se observa misma condición para curvas de radio 1.000 y 1.500 m (en estos casos se observa que V85, entre 123 y 128 km/h, resulta muy similar a la velocidad deseada de 128 km/h obtenida del contador de la DNV).

Asimismo, la diferencia entre V85 de recta y curva resulta inadecuada (> 20 km/h según sentido) en 8 o 9 curvas, según el sentido de análisis, de las cuales solo 3 se corresponden con la Travesía Urbana de Reducción (prog. 556+000 a 560+000) y las restantes con tramos en donde se observan $R \leq 600$ m. Se registra también Condición 3 para radios de 1.000 y 1.500 m, lo cual en principio podría relacionarse con que el programa tal vez subestime V85 en curvas horizontales (el máximo registrado varía entre 101 y 104 km/h para dichos radios).

RN9 (N) – Simbolar: En el tramo de 24 km hay un total de 12 curvas horizontales, de las cuales solo 1 curva con $R < 600$ m (350 m). Para la mayoría de curvas se observa para Criterio I: Condición

2 (excepto Condición 3 para curvas de R 600 y 350 m).

Para Criterio II: Condición 1 principalmente, excepto Condición 2 (en tres y cuatro curvas, según sentido de análisis) con R 1.000, 1.500, 2.500 y 10.000 m (llamativamente con igual diferencia de velocidades a pesar de los radios disímiles). En coincidencia con estos casos, se observa una V85recta entre 112 y 114 km/h, muy similar a velocidad deseada de 114 km/h obtenida del contador de la DNV.

Resulta llamativo que la V85 en curvas horizontales, según estimación del programa, varíen muy poco en relación al radio, ya que se observan variaciones entre 102 y 106 km/h, para radios que van desde 1.000 a 10.000 m, a partir de lo cual podría inferirse que el programa subestima V85 en curvas.

RN 1V09 – Oliva: Este tramo de 50 km presenta la particularidad de que el total de las 8 curvas horizontales tienen R<600 m (dos de 100, dos de 250 y cuatro de 350 m), observándose una Condición 3 para ambos Criterios (I y II) en 8 y 4 sitios respectivamente. Todas las curvas se corresponden con accesos a Travesías Urbanas (lo cual explica el reducido valor del radio).

RN 1V09 – Morrison: Este tramo de 47 km presenta solo 3 curvas horizontales con R≥600 m (uno de 600 , uno de 1.000 y otro de 2.000 m), observándose Condición 2 para ambos Criterios (I y II) en todos los sitios. A diferencia de RN9 Simbolar, aquí se observa que a mayor radio de curva, menor es la reducción de velocidad, lo cual resulta lógico.

RN19 – Bº Don Justiniano: En el tramo de 56 km hay un total de 20 curvas horizontales, de las cuales 16 tienen R<600 m (entre 100, 150, 200, 250 y 500 m). En la mayoría de curvas se observa para Criterio I: Condición 3 (excepto Condición 2 para las curvas de R 900 y 1.000 m).

Para Criterio II: Condición 3 prácticamente en coincidencia con las anteriores, debido a la existencia de cuatro travesías urbanas dentro del tramo. En general se observa que V85 en rectas resulta de 114 km/h, muy similar a la velocidad deseada de 113 km/h obtenida del contador de la DNV ubicado en el tramo.

Asimismo, la diferencia entre V85 de recta y curva, resulta inadecuada (>20 km/h según sentido de análisis) en 8 sitios para cada sentido de análisis, los cuales se corresponden con las travesías urbanas de Pedro Vivas, Los Chañaritos, Santiago Temple y Tránsito). En resto de los casos se observa Condición 2 para radios de curva de 900 y 1.000 m.

RN35 – Aº El Gato: Tramo de 11 km con 3 curvas horizontales de R>600 m (dos de 700 y uno de 1.000 m), observándose para Criterio I: Condición 2 y para Criterio II: Condición 1 en todos los

sitios.

RN60 – Quilino: Este tramo de 78 km presenta 9 curvas horizontales con R>>600 m (uno de 1.200, uno de 5.000 y el resto de 10.000 m), observándose para Criterio I: Condición 2 y para Criterio II: Condición 2 mayormente (excepto en dos curvas en sentido ascendente) y Condición 1 en sentido descendente (en este último caso, la menor diferencia de velocidades puede tener relación con el desarrollo altimétrico de la traza, con pendiente ascendente en toda su extensión).

La V85 en rectas que estima el programa (entre 113 y 119 km/h) resulta similar a la velocidad deseada de 119 km/h obtenida del contador de la DNV ubicado en el tramo.

RN158 – Laspiur: Este tramo de 76 km tiene un total de 26 curvas horizontales, de las cuales se observan 12 curvas con R<600 m (entre 210, 350 y 500 m). Para la mayoría de curvas se observa para Criterio I: Condición 2 y 3 (trece curvas en cada caso), y para Criterio II: Condición 1 y 2 en su gran mayoría. En general se observa que V85 en rectas resulta entre 97 y 122 km/h (en algunos casos muy alejada de la velocidad deseada de 122 km/h obtenida de un contador de la DNV ubicado en el tramo). Asimismo, la diferencia entre V85 de recta y curva, resulta inadecuada (>20 km/h según sentido de análisis) en 4 sitios para sentido ascendente, los cuales se corresponden con las travesías urbanas de Las Varas, Colonia Prosperidad, Quebracho Herrado y Saturnino Laspiur. En sentido descendente se observan 7 sitios en la misma situación.

Una vez expuestos los resultados particulares de cada tramo, se muestran los resultados obtenidos del análisis global realizado para la totalidad de los tramos considerados:

- La geometría de los tramos analizados se corresponde con una Categoría II ($1500 < \text{TMDA} < 5000$) en terreno llano ($i_{\text{max}} \leq 3\%$) con una velocidad de diseño de 120 km/h. La única excepción es el tramo N°9 (RN19) con 6560 veh/día, en tanto que ninguno de los tramos supera un gradiente de 2,6% (la gran mayoría debajo del 1%). Los radios de curvas horizontales requieren un mínimo deseable de 900 m y mínimo absoluto de 600 m, con peralte máximos del 8%. En gran parte de los tramos analizados se cumplen estos valores (radios mínimos de 600 m y peralte máximos de 6%), excepto en ingresos a Travesías Urbanas, en donde se observan valores entre 100 y 500 m).
- En curvas horizontales, la V85 que calcula el programa no presenta variaciones significativas para radios mayores al mínimo absoluto. Por ejemplo, para radios entre 700 y 10.000 m se observa $100 \leq V85 \leq 106$ km/h. Para radios

entre 100 y 600 m, el rango es más amplio ($69 \leq V85 \leq 100$ km/h).

- Para el Criterio I, la diferencia $|V85 - Vd|$, para Vd de 120 km/h se observa en todos los casos que, para $R < 600$ m, se obtiene Condición 3. Para $600 \leq R \leq 10.000$ m, según geometría de tramos analizados, se obtiene Condición 2. No se observan tramos de Condición 1 (excepto que se adopte una velocidad de diseño de 110 km/h, es decir, idéntica a la máxima señalizada en siete de los nueve tramos).
- Reiterando el análisis anterior, pero considerando Vd coincidente con la máxima señalizada (110 y 80 km/h según tramo) se observa que para $100 \leq R \leq 1.000$ m, se obtiene Condición 3. Para radios entre $100 \leq R \leq 800$ m, según la geometría de los tramos, se obtiene Condición 2. Para $R \geq 750$ m, en general se obtiene Condición 1 (con excepción de algunas curvas en RN 19. Bº. Don Justiniano, en donde se obtuvo dicha Condición para radios entre 150 y 200 m llamativamente). En base a lo expuesto, no se observan límites claros entre rangos de valores de radios de curvas horizontales y la posible Condición que pudiera presentar la misma según Criterio I.
- Para el Criterio II, la reducción entre elementos adyacentes $|V85_{recta} - V85_{curva}|$, para Vd de 120 km/h se observa en todos los casos que, para $R < 600$ m, se obtiene Condición 3, con excepción de casos puntuales en donde se obtiene la misma condición para $R= 1.000$ y 1.500 m. Para la Condición 2 y Condición 1 no se observan límites claros respecto del rango de radios dentro del cual se pueda obtener como resultado las mismas.
- Reiterando el análisis anterior, pero considerando Vd coincidente con la máxima señalizada (110 y 80 km/h según tramo) se observa que para $100 \leq R \leq 750$ m, se obtiene Condición 3 y excepcionalmente también en tres casos para $R= 1.000$, 1.500 y 2.000 m solamente en el tramo de RN 8 (Reducción). Para $R > 600$ m, según la geometría de los tramos, se obtiene Condición 2 en la mayoría de los casos (excepto algunos puntuales con radios de 100, 150, 400, 500, 600 m). Para $R \geq 700$ m, se obtiene en general Condición 1 (con excepción de algunas curvas en donde se obtuvo igual Condición para $100 \leq R \leq 400$ m llamativamente). Al igual que para el Criterio I, los límites de rangos de valores de R que puedan asociarse con Condiciones 1 o 2, no resultan claros para las Vd indicadas.
- En general no se observan diferencias significativas en la cantidad de tramos Condición 2 y 3 (según Criterio II)

según se considere uno u otro sentido de circulación, lo cual se infiere tiene relación con la topografía (llanura) en la cual se desarrollan. Cabe destacar en tal sentido, solamente la RN60 (Quilino), en donde se observa una clara diferencia en sitios Condición 1 (solo dos en sentido ascendente y nueve en sentido descendente). En base a ello se concluye que los gradientes en topografía llana no resultan determinantes para estimar $V85$.

4. Conclusiones.

En función de lo anteriormente desarrollado, pueden realizarse las siguientes consideraciones finales a modo de conclusiones:

- En relación al Criterio I, es importante destacar que en todos los casos la velocidad directriz indicada por norma y la máxima señalizada, no son coincidentes. Esto, sumado a las situaciones de subvaloración de la $V85$ predicha por IHSDM, genera que no se observen límites claros entre rangos de valores de radios de curvas horizontales y posibles condiciones de consistencia de diseño establecidas. Es por ello, que se ha dificultado obtener patrones de caracterización para determinar la consistencia general de los tramos analizados y plantear eventuales recomendaciones aplicables a la normativa de diseño. Se recomienda indagar a futuro con mayor detalle sobre la $V85$ a lo largo de los tramos estudiados (medida en campo) para cotejarla con aquella predicha por IHSDM, analizar una eventual calibración del mismo a las condiciones locales y establecer patrones de caracterización de las mismas.
- En el caso del Criterio II, se aprecia que en todos los tramos que presentan travesías urbanas, la diferencia de velocidades de operación no es atendida mediante el diseño geométrico, por lo que se observan situaciones inconsistentes en las transiciones entre sectores rurales y urbanos, donde la diferencia máxima de velocidad de 20 Km/h es superada. Al ser todos caminos de llanura, se destaca ésta como la situación crítica a atender en el diseño planimétrico, la cual debe ser destacada y correctamente estudiada específicamente. De esta manera, sería posible desarrollar y sistematizar normativamente recursos del diseño geométrico planimétrico que permitan garantizar una gradualidad en la variación de las velocidades de operación, asegurando diferencias menores al límite de inconsistencia, para poder generar diseños geométricos consistentes y lograr transiciones de velocidades en travesías urbanas con mayor seguridad.

- Cabe mencionar que el propósito del Análisis de Consistencia no es sustituir los modelos y/o normas que actualmente se utilizan para el diseño geométrico (Echaveguren y Saez, 2001), sino complementarlos, ya que tiene por finalidad estudiar las causas de inconsistencias en los diseños, proveer criterios que permitan evaluar trazados y dar soluciones a los potenciales problemas de consistencia.

5. Agradecimientos.

Los autores desean agradecer al 2º Distrito (Córdoba) de la Dirección Nacional de Vialidad los datos de tránsito de los censos de cobertura que fueran provistos en formato digital, para cada uno de los tramos analizados, durante el período comprendido entre los años 2010 a 2017, de donde se obtuvieron datos de volumen, composición y velocidades deseadas (livianos, pesados y total).

6. Referencias.

- R. Vargas R. P. y N. C. Vanegas, (2016) Definición del Modelo de Consistencia de Velocidad para una Carretera Rural en el Departamento de Santander a partir de un Tramo Experimental. XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- S. M. Easa y A. Mehmood (2007) Establishing Highway Horizontal Alignment to Maximize Design Consistency. nrc Res. Press Web, vol. 34, pp. 1159-1168.
- M. Castro, L. Iglesias, R. Rodríguez Solano y J. Sánchez (2006) Geometriz Modelling of Highways Using Global Positioning System (GPS) data and spline approximation. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.06.004>.
- T. Echaveguren, J.Saez (2001) Indicadores de Consistencia en el Diseño Geométrico de Carreteras. X Congreso Chileno de Ingeniería de Transportes. Concepción, Chile.
- M. Imran, M.; Hasan, Y.; Patterson, D. (2006). Procedimiento Basado en GPS-GIS para Rastrear la Trayectoria de un Vehículo en Alineaciones Horizontales, Ingeniería Civil y de Infraestructura Asistida por Computadora 21(5): 383–394. doi:10.1111/j.1467-8667.2006.00444.x