





















La sección de la carretera está compuesta por dos carriles de 3,50 m con arcenes asimétricos de 1,50 metros y 2,50 metros, a la derecha e izquierda de la vía en el sentido de P.K. crecientes, con bermas de 1,00 m, resultando en una anchura total de 13,00 m. La carretera se proyectó como una autovía A-100, con capacidad de tráfico de 50.000 veh/día y un tráfico pesado T0.

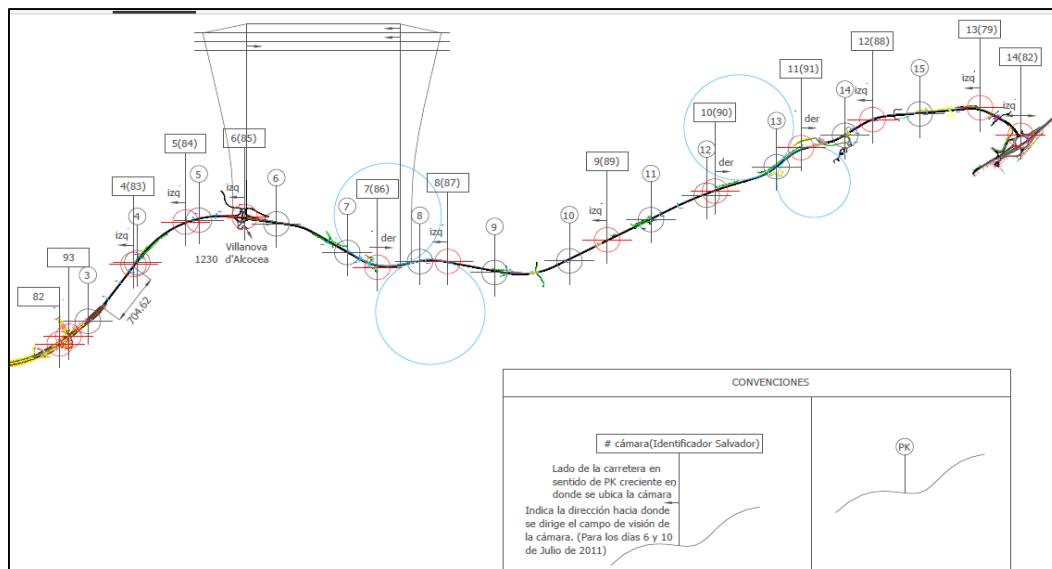
El perfil longitudinal de la carretera tiene pendientes y rampas próximas al 5% lo que ha originado un carril adicional para vehículos lentos de 2700 m de longitud.

Con el objetivo de mejorar la seguridad vial se ha dotado de una instalación ITS (Sistemas Inteligentes de Transporte) de vigilancia y control convencional integrado por 14 cámaras que ha servido para monitorizar por imágenes el 100% de la carretera, lo cual ha sido útil en la toma de información de tránsito.

Otras especificaciones de la carretera son:

- Velocidad específica del tronco: 100 km/h.
- Radio mínimo: 450 m.
- Número de carriles:
  - P.K. 3+200 al P.K. 16+500: Calzada única de 2 carriles.
  - P.K. 5+200 al P.K. 7+900: Calzada única de 3 carriles (con carril adicional para vehículos lentos).

En las Figura 2 se muestra el entorno en el que discurre la carretera CV-13.



**Figura 2. Esquema general del trazado en planta de la CV-13.**

El volumen medido para el sentido creciente de P.K. es de 184 veh/h y en el inverso 191 veh/h.

En cada cámara se observó el tránsito y se midió:

- Subtramos de carretera, entre cámaras, en los cuales los vehículos viajaban en estado de seguimiento y consecuentemente el tiempo de seguimiento.
- Velocidad de recorrido (ATS).
- Tiempo de recorrido
- Porcentaje de tiempo consumido en el seguimiento o demora (PTSF)
- Volumen horario y composición vehicular.
- Estimación de la velocidad deseada en tramos horizontales como la velocidad a flujo libre.
- Velocidad máxima de entrada a la carretera, por cada tipo de vehículo.

Con toda la información obtenida se pudo determinar las condiciones de geometría de la vía y de tránsito del carril lento.

#### **4.2 Calibración del TWOPAS**

Con la información obtenida a partir de los datos observados en la CV13 y descritos en el aparte anterior se caracteriza el comportamiento actual de la vía y se estiman los valores de indicadores operacionales para calibrar el TWOPAS para España; Valencia (2016) calibró el TWOPAS para Colombia y la metodología aplicada es la que se considera en este trabajo.

#### **4.3 Estimación del nivel de servicio según el HCM**

El HCM de 2010 propone un método para estimar el nivel de servicio en tramos de carreteras de dos carriles conteniendo un carril lento mediante el valor promedio ponderado del PTSF y de la ATS y según un modelo de comportamiento de estas dos variables el cual se aplica a la CV13.

#### **4.4 Aplicación del TWOPAS calibrado en la CV13**

Se aplica el TWOPAS calibrado en la CV13 para conocer el PTSF y ATS, entre otros indicadores operacionales, a lo largo de toda la carretera y especialmente en el carril lento y poder estimar su nivel de servicio. Se hace una comparación con los resultados obtenidos con el método del HCM y obtener conclusiones sobre su aplicabilidad.

### **5 RESULTADOS**

#### **5.1 Calibración**

Para representar el comportamiento de la carretera se configuró el TAM mediante el uso del programa ADMINISTRATION TOOL en el archivo CONFIGURACION6. Aquí se modificaron algunos parámetros del modelo de simulación entre los que se destacan las características de prestación de los vehículos:

- Tipo de vehículo.
- Relación peso/potencia. Ver Tabla 2.
- Relación Área frontal proyectada/peso.
- Longitud.
- Factor de corrección de la potencia.
- Factor de corrección del arrastre aerodinámico.
- Velocidad máxima de entrada para el sentido 1 de circulación en la carretera.
- Velocidad máxima de entrada para el sentido 2 de circulación en la carretera.
- Porcentaje de participación de este tipo de vehículo en el sentido 1 de circulación en la carretera de acuerdo a la categoría que le corresponde.
- Porcentaje de participación de este tipo de vehículo en el sentido 2 de circulación en la carretera de acuerdo a la categoría que le corresponde.

### 5.1.1 Velocidades residuales de vehículos pesados

En la CV13 se estimó la relación peso/potencia usada por los camiones aplicando una expresión que relaciona las fuerzas y resistencias que participan en el desplazamiento de un camión al circular por una rampa a velocidad residual; para ello se midió esta velocidad en una rampa del 4,7 % ubicada al lado de la cámara de control 11 en el P.K. 13+470,900. En la Tabla 2 se presentan los resultados por tipo de camión que considera el TWOPAS definidos de acuerdo al parque automotor observado en la CV-13. Este valor se usó en la aplicación del TWOPAS para su calibración.

TIPO DE CAMIÓN PARA TWOPAS	Descripción para observación en vídeos	VELOCIDAD RESIDUAL (km/h)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (km/h)	RELACIÓN PESO/POTENCIA ESTIMADA (kg/CV)
1	C art	42.5	9.1	85.7
2	C rigido2 (Contenedor)+ Cart1 (Rigido + remolque)	41.6	N.D.	88.0
3	C rigido + C rigidovacio	40.4	3.4	90.6
4	C rigidopeque (Volquete, grúa)	45.8	13.7	82.7

**Tabla 2. Velocidad residual y relación peso/potencia de camiones en la CV-13. (Valencia, 2016)**

Se ejecutó el TWOPAS y sus resultados son entregados por el modelo en las estaciones o P.K. a lo largo de la carretera y por tramos con características específicas como el tramo de solo carretera convencional y el tramo que contiene el carril lento.

Algunas características de la aplicación del TWOPAS se indican a continuación:

IHSDM Version: v9.1.0 (Feb 09, 2014)

Traffic Analysis Module: v1.4.0 (Apr 26, 2010)

Project Title: VALIDACIÓN TWOPAS 2

Project Comment: Created Mon Jul 01 17:34:45 CEST 2013  
 Highway Title: cv-13 prueba  
 Highway Comment: Created Thu Jul 04 12:46:45 CEST 2013  
 Highway Version: 8  
 Evaluation Title: EVALUACIÓN DE LA CARRETERA CV-13  
 Evaluation Comment: Created Sat Sep 05 15:56:39 COT 2015  
 Minimum Station: 3+880.500  
 Maximum Station: 16+343.400  
 Configuration Name: CONFIGURACION6

En la Tabla 3 se presenta una réplica de los datos de entrada generales.

Direction of Travel	Flow Rate (vph)	Distribution Cars (%)	Distribution Trucks (%)	Distribution RVs (%)	Mean Desired Speed Cars (km/h)	Mean Desired Speed Trucks (km/h)	Mean Desired Speed RVs (km/h)	Desired Speed Standard Deviation Cars (km/h)	Desired Speed Standard Deviation Trucks (km/h)	Desired Speed Standard Deviation RVs (km/h)	Entering Traffic in Platoons (%)	No Passing Zone (%)
Increasing	163	64	36	0	118.8	95.2	95.7	13.5	5.5	6.4	25	35
Decreasing	179	62	38	0	106.2	85.5	95.7	11.4	7.1	6.4	27	46

**Tabla 3. Datos de entrada del tránsito.**

La carretera CV-13 que se consideró para hacer la calibración del TWOPAS está comprendido entre el P.K. 8+264,000 y P.K.16+333,400; en la Tabla 4 se presentan los resultados de la simulación.

Direction of Travel	Flow Rate from Simulation (vph)	Percent Time Spent Following (%)	Average Travel Speed (km/h)	Trip Time (min/veh)	Traffic Delay (min/veh)	Geometric Delay (min/veh)	Total Delay (min/veh)	Number of Passes	Distance Traveled (km)	Total Travel Time (veh-hrs)
Increasing	162	48	87.2	5.5	0.4	0.5	0.9	47	1,304.0	14.9
Decreasing	180	44	65.2	7.4	0.7	2.0	2.8	113	1,446.4	22.2
Combined	342	46	75.6	6.5	0.6	1.3	1.9	160	2,750.4	37.1

**Tabla 4. Resultados entre P.K. 8+264,000 hasta P.K.16+333,400 de solo carretera convencional.**

Para la calibración del TWOPAS (TAM) se analiza el grado de aproximación entre los valores de indicadores operacionales simulados por el modelo y los valores correspondientes medidos directamente por observaciones del tránsito en un tramo de la carretera CV-13 comprendido entre el P.K. 8+264,000 hasta P.K.16+333,400; los resultados se presentan en la Tabla 5.

Los valores de la columna titulada Grado de Aproximación corresponde al porcentaje por exceso o defecto que el valor del indicador simulado en la operación vehicular en la carretera, por lo tanto, un valor negativo indica que TWOPAS subestima el valor medido en la vía. Por su parte, el número del grado de aproximación refleja la proximidad de la anterior estimación y de acuerdo a los niveles de aproximación que se ha observado en

calibraciones y validaciones con el uso modelos de microsimulación resulta aceptable si este valor fuese menor de 10; por lo tanto, puede considerarse que, aunque los resultados están ligeramente superior a este valor referente, el TWOPAS estaría calibrado a las condiciones de una carretera como la CV-13 en condiciones de España.

INDICADOR OPERACIONAL	MEDIDOS EN LA CV13		SIMULADOS CON TWOPAS (TAM)		GRADO DE APROXIMACIÓN (%)	
	Dirección 1 (Pks crecientes)	Dirección 2 (Pks decrecientes)	Dirección 1 (Pks crecientes)	Dirección 2 (Pks decrecientes)	Dirección 1 (Pks crecientes)	Dirección 2 (Pks decrecientes)
FLUJO (veh/h)	181,8	178,7	162	180	-10,9%	0,7%
PTSF (%)	36	39	48	44	33,3%	12,8%
VELOCIDAD PROMEDIO DE RECORRIDO (km/h)	93,1	81,9	87,2	65,2	-6,3%	-20,4%
TIEMPO DE RECORRIDO (min/veh)	5,17	6,1	5,5	7,4	6,4%	21,3%
NUMERO DE ADELANTAMIENTOS	ND	ND	47	113	ND	ND
DISTANCIA RECORRIDA TOTAL (km)	1421,19	1.452,55	1304	1446,4	-8,2%	-0,4%
TIEMPO TOTAL DE VIAJE (veh-h)	15,1	19	14,9	22,2	-1,3%	16,8%
PROMEDIO DEL GRADO DE APROXIMACION					2,2%	5,1%
PROMEDIO DE LOS VALORES ABSOLUTOS DEL GRADO DE APROXIMACION					11,1%	12,1%

**Tabla 5. Grados de aproximación entre valores medidos en la CV-13 y simulados con TWOPAS.**

## 5.2 Nivel de servicio con HCM

Al aplicar la metodología para estimar el nivel de servicio del HCM (TRB, 2010) en el carril lento con las siguientes características:

- Volumen direccional en ascenso = 179 veh/h
- Volumen direccional en descenso = 163 veh/h
- Distribución direccional: 52% en el ascenso y 48 % en el descenso.
- FHP = 0,90
- Zonas de adelantamiento prohibido en las dos direcciones = 62,8%
- Porcentaje de camiones de 38% en el ascenso y 36% en el descenso.
- Anchura de carril de 3,50 m.
- Arcén en el sentido ascendente = 2, 50 m
- Arcén en el sentido descendente = 1, 50 m
- Número de acceso por milla = 0.
- Velocidad a flujo libre básica (BFFS): 106,2 km/h en el ascenso y 118,8 km/h en el descenso.
- Longitud del carril lento = 5822 m

Se desarrolló el procedimiento del HCM para determinar el Nivel de Servicio de la carretera convencional sin carril lento arrojando los resultados de la Tabla 6.

INDICADOR	VALOR	NIVEL DE SERVICIO
ATS <sub>d</sub>	97,2 km/h	A
PTSF <sub>d</sub>	51 %	C

**Tabla 6. Nivel de servicio en la carretera convencional según procedimiento del HCM (TRB, 2010).**

Posteriormente se aplicó el procedimiento para estimar el nivel de servicio en la carretera convencional conteniendo el carril lento y considerando que el segmento de carretera CV13 está constituido solo por el carril lento con longitud ( $L_{pl}$ ) de 2630 m, es decir, no se consideraron las regiones previas ni posteriores al carril lento:  $L_u$ , Longitud antes del carril adicional;  $L_{de}$ , longitud efectiva y  $L_d$ , Longitud después de la longitud efectiva  $L_{de}$ .

Se obtuvieron los resultados de la Tabla 7 que refleja la mejora de la calidad de circulación en relación a la carretera sin carril lento.

INDICADOR	VALOR	NIVEL DE SERVICIO
ATS <sub>pl</sub>	111 km/h	A
PTSF <sub>pl</sub>	10 %	A

**Tabla 7. Nivel de servicio en la carretera con carril lento según procedimiento del HCM (TRB, 2010).**

### 5.3 Nivel de servicio con TWOPAS calibrado

Los resultados de aplicar el TWOPAS (TAM-IHSDM) calibrado en la carretera CV13 y considerando, en primera instancia, toda la carretera convencional (P.K. 3+880.500 y P.K.16+343,400) y luego solo el carril lento (P.K. 5+271.100 to 7+709.800) se presentan en las Tablas 8 y 9, respectivamente.

Direction of Travel	Flow Rate from Simulation (vph)	Percent Time Spent Following (%)	Average Travel Speed (km/h)	Trip Time (min/veh)	Traffic Delay (min/veh)	Geometric Delay (min/veh)	Total Delay (min/veh)	Number of Passes	Distance Traveled (km)	Total Travel Time (veh-hrs)
Increasing	167	44	87.7	8.5	0.3	1.0	1.3	47	2,065.6	23.6
Decreasing	181	40	65.5	11.2	0.8	3.3	4.1	447	2,217.2	33.9
Combined	348	42	76.2	9.9	0.6	2.2	2.8	494	4,282.8	57.4

**Tabla 8. Resultados entre P.K. 3+880.500 y P.K.16+343,400.**

Direction of Travel	Flow Rate from Simulation (vph)	Percent Time Spent Following (%)	Average Travel Speed (km/h)	Trip Time (min/veh)	Traffic Delay (min/veh)	Geometric Delay (min/veh)	Total Delay (min/veh)	Number of Passes	Distance Traveled (km)	Total Travel Time (veh-hrs)
Increasing	175	40	88.8	1.6	0.1	0.1	0.2	0	426.3	4.8
Decreasing	176	20	67.8	2.2	0.0	0.7	0.8	315	429.1	6.3
Combined	351	30	78.3	1.9	0.1	0.4	0.5	315	855.4	11.1

**Tabla 9. Resultados entre P.K. 5+271.100 to 7+709.800 que contiene el carril lento.**

Los resultados generales se ilustran considerando varios indicadores a lo largo del recorrido de la carretera que se muestran en la Figura 3 solo para el sentido de circulación que contiene el carril lento. La graficas de dicha figura corresponden a:

- Ubicación de intersecciones.
- Altitud.
- Valor de K en m/% para las curvas verticales.
- Grado de curvatura en grados sexagesimales de las curvas horizontales.
- Radio de las curvas horizontales en metros.
- Porcentaje de Tiempo consumido en el seguimiento vehicular (PTSF).
- Volumen en veh/h.
- Velocidad para autos y camiones en km/h.

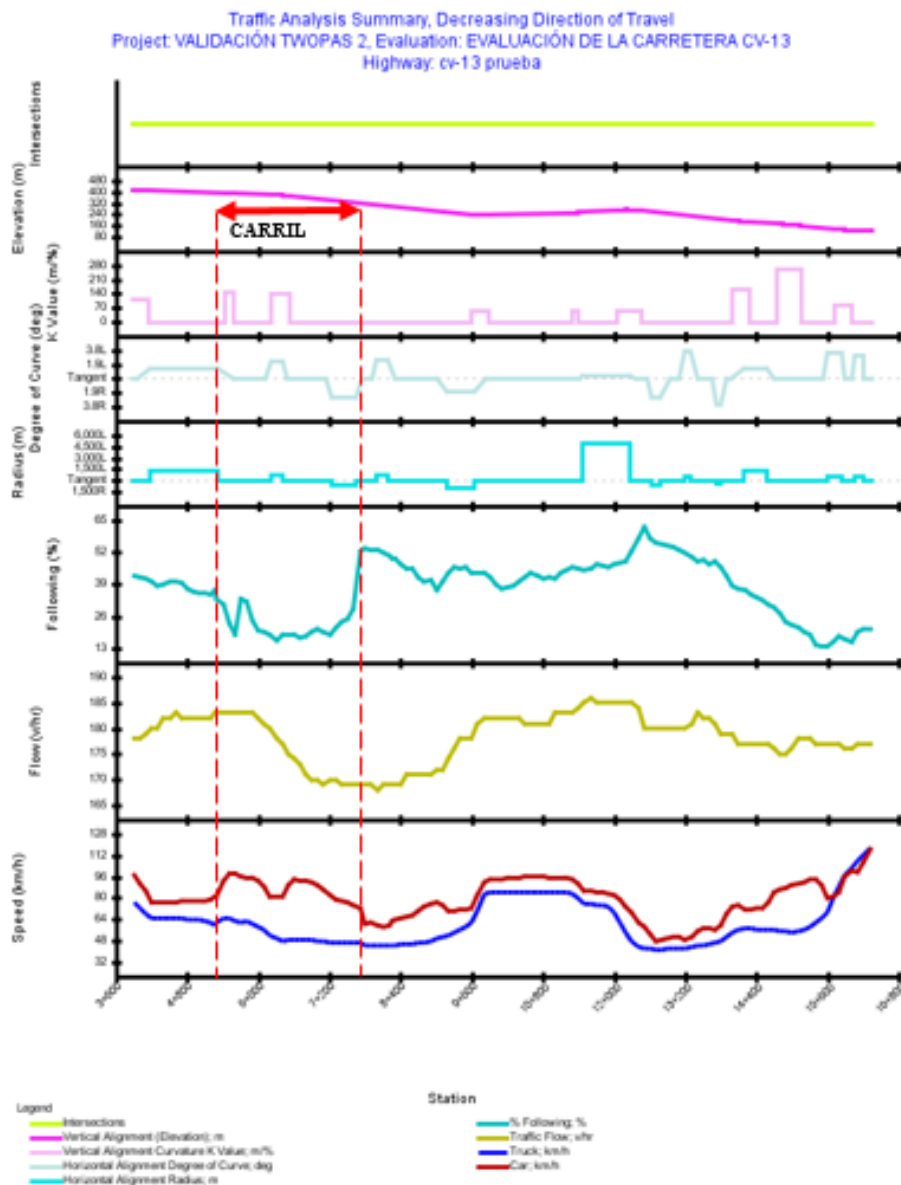


Figura 3. Resumen del análisis de tránsito en la CV-13 sentido decreciente de P.K.



Según los resultados de PTSF y ATS en el segmento que contiene el carril lento de la Tabla 9 y considerando los criterios para el nivel de servicio en carreteras convencionales del HCM 2010 los niveles de servicio resultantes se muestran en la Tabla 10.

TRAMO	INDICADOR	NIVEL DE SERVICIO
Toda la carretera	ATS = 65,5 km/h = 40,9 mi/h	D
	PTSF = 40	B
Carril lento	ATS = 67,8 km/h = 42,4 mi/h	D
	PTSF = 20	A

**Tabla 10. Nivel de servicio sin y con carril lento según simulación con TWOPAS.**

## 6 CONCLUSIONES

- Las mediciones de relación peso/potencia utilizada en la circulación de los camiones arrojó como resultado un valor de 88 kg/CV que corresponde, de manera práctica, con el vehículo de diseño considerado en el criterio del Libro Verde (AASHTO, 2011) de 120 kg/KW (90 kg/CV) para justificar la dotación de carriles lentos y que ha sido acogido por la normativa española reciente evidenciando la correspondencia con la situación real observada en la vía.
- El grado de aproximación aceptable obtenido entre los indicadores simulados por el TWOPAS y los medidos en la CV13 permiten concluir que este modelo resulta calibrado para la carretera CV13 habilitándose como herramienta de análisis del tránsito así como fue usada en este trabajo.
- Según los resultados de calibración obtenidos puede considerarse que la calibración del TWOPAS puede ser mejorada abordando algunos procedimientos adicionales como medidas más detalladas de otros indicadores como las demoras geométricas, demoras por tránsito, número de adelantamientos y otros que son objeto de un estudio, continuación del presente, para estudiar la justificación de la conversión de carreteras convencionales a multicarriles.
- Al comparar los niveles de servicio resultantes considerando los dos procedimientos usados, el del HCM y usando los resultados de la simulación, conducen a concluir que ambos muestran mejoría en la operación vehicular con la provisión del carril lento principalmente con el indicador PTSF pero se mantiene con el ATS.
- A pesar que el TWOPAS fue calibrado, y por esto podría considerarse que los resultados de los indicadores representan el comportamiento del tránsito en la

CV13, estos difieren de los resultados de los indicadores obtenidos por el procedimiento del HCM que considera el mismo vehículo patrón, aquel con relación peso/potencia de 90 kg/CV, principalmente en el indicador PTSF por lo que se concluye que es necesario mejorar la calibración del TWOPAS o adaptar el procedimiento del HCM a las condiciones de España.

- Según los resultados de la simulación de la CV13 con el TWOPAS y particularmente en la evaluación del carril lento se destaca la ubicación extraña del carril lento al final de la rampa cuando los indicadores de PTSF y ATS ilustrados en la Figura 3 indican que el mayor beneficio se hubiese logrado si este carril lento iniciara cerca del comienzo la rampa en el mismo sentido de circulación. El lugar más conveniente operacionalmente se puede determinar mediante una serie de aplicaciones del TWOPAS calibrado como lo recomendaron Valencia y García en 2010.

## REFERENCIAS

- AASHTO. (2011). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, fifth edition. Washington, D. C.: AASHTO. Washington, D.C. EUA. xlv + 1006 pp
- Brewer, M. A. y Venglar, S. P. (2010). Passing behavior of drivers on Super 2 highways in Texas. En: 4th International Symposium on Highway Geometric Design. Valencia, Spain.
- FHWA. (2013). *Traffic Analysis Module Engineer's Manual*. Federal Highway Administration. Office of Safety Research and Development, Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean, VA. September.
- Freedman, Z. and Al-Kaisy, A. (2013). Investigation of performance and lane utilization within a passing lane on a two lane rural highway. En: *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 2013, 3(3): 279 – 290.
- Generalitat Valenciana. (2010). Puesta en servicio de la CV-13 entre la CV10 (Benlloch) y la AP7 (Torreblanca). Conselleria D'Infraestructures I Transport. Valencia (España). (Valencia A., V. G. (1998 a) Estudio de rampas en carreteras convencionales para la optimización del alineamiento y sus efectos operacionales, ambientales y económicos. Tesina de especialización. Universidad Politécnica de Valencia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. España.)
- GLENNON, J. C. (1970). *An Evaluation of Design Criteria for Overtaking Trucks Safely on Grades*. Highway Research Record 312, Highway Research Board. 93-112 pp.
- Harwood, D. W. & St. John, A. D. (1986). Operational effectiveness of passing lanes on two-lane highways. Report N° FHWA/RD-86/196. Federal Highway Administration. April.

- Texas Transportation Institute, The Texas A&M University (2001) Design Guidelines for passing lanes on two-lane roadways (Super 2). FHWA report 4061-1. Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office, Austin, Texas pp 106.
- Ahmed, Al-Kaisy and Zachary, Freedman. (2010). Empirical Examination of Passing Lane Operational Benefits on Rural Two Lane Highways. En: Journal of the Transportation Research Forum, Vol. 49, No. 3 (Fall 2010), pp. 53-68.
- Khan, A. M. et al. (1990). Heavy Vehicle Performance on Grade and Climbing Lane Criteria. *Research and Development Branch, Ministry of Transportation*. Ontario, Canadá. Noviembre, pp. x + 78.
- Khan, A. M. et al. (1991). Cost-effectiveness of Passing Lanes: Safety, Level of Service, and Cost Factors. *Research and Development Branch, Ministry of Transportation*. Ontario, Canadá. September, pp. xi + 124.
- May, A. D. (1991). Traffic Performance and Design of Passing Lanes. In *Transportation Research Record 1303*, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp. 63-73.
- Messer C. J., (1983). Two-lane, two-way highway capacity. Final report of NCHRP Project 3-28A. Transportation Research Board.
- MINISTERIO DE FOMENTO DE ESPAÑA (2016). Norma 3.1-IC. Trazado (Orden FOM/273/2016 de 19 de febrero de 2016). Consulta en Internet: [http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/CARRETERAS/NORMATIVA\\_TECNICA/TRAZADO/](http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/CARRETERAS/NORMATIVA_TECNICA/TRAZADO/).
- Morrall, J. y Thomson, W. (1990). *Planning and Design of Passing Lanes for the Trans-Canada Highways in Yoho National Park*. En *Canada Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, N° 1. Canadá, Febrero pp. 79-86.
- NCHRP (1998). Capacity and quality of service of two-lane highways. NCHRP PROJECT 3-55(3). Task 6, Enhance, calibrate, and validate the selected simulation model. TWOPAS model improvements.
- Transportation Research Board (2010). *Highway Capacity Manual. HCM 2010*. Washington, D. C.: Transportation Research Board. E.U.
- Valencia, V. G., Bedoya, V. E. y Osorno, M. E. (1996) Relación Peso/Potencia de Vehículos Pesados en Colombia. En: Memorias del IX Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte. Diciembre 6. La Habana (Cuba).
- Valencia, V. y García, A. (2010). Procedures to Facilitate Passing on Conventional Highways by Means of Simulation. En: Proceedings of 4th International Symposium on Highway Geometric Design. Valencia (España). Junio 1 al 5.
- Valencia Alaix, V. G. (2016). Elaboración de procedimientos para facilitar el adelantamiento en carreteras convencionales aplicando simulación [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València. doi:10.4995/Thesis/10251/62413.