



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS**

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

**DESARROLLO DE MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN
DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN DE VEHÍCULOS
PESADOS EN CARRETERAS CONVENCIONALES A
PARTIR DE DATOS NATURALÍSTICOS**

Máster en Transporte, Territorio y Urbanismo

Autor: BRAYAN DUWAN GONZÁLEZ HERNÁNDEZ
Tutor: Prof. Dr. ALFREDO GARCÍA GARCÍA
Cotutor: Prof. Dra. ANA MARÍA PERÉZ ZURIAGA
Director Experimental: DAVID LLOPIS CASTELLÓ

Febrero 2018

A mis padres y todos los cómplices de este esfuerzo...

RESUMEN

La seguridad vial es una de las principales preocupaciones en nuestra sociedad. En este sentido, tres son los principales factores concurrentes en la siniestralidad: el factor humano, el vehículo y la infraestructura.

La interacción entre el factor humano y la infraestructura es estudiada a través de la consistencia del diseño geométrico, la cual se define como el grado de adecuación entre las expectativas de los conductores y el comportamiento de la carretera.

De esta manera, un bajo nivel de consistencia del diseño geométrico puede llevar a que los conductores se vean sorprendidos ante ciertas configuraciones de la misma, incrementando la probabilidad de ocurrencia de accidentes.

La consistencia del diseño geométrico de carreteras es evaluada comúnmente a través del análisis de la velocidad de operación de los vehículos ligeros debido en parte a los pocos modelos existentes para la estimación de la velocidad de operación de los vehículos pesados. Sin embargo, la interacción entre ambos tipos de vehículos es un factor clave en la ocurrencia de accidentes.

Por ello, el objetivo principal del presente trabajo de investigación es analizar y modelizar la velocidad en flujo libre desarrollada por vehículos pesados en curvas y rectas de carreteras convencionales.

Los modelos desarrollados han sido calibrados a partir de perfiles de velocidad continuos obtenidos por medio de dispositivos GPS en un total de 12 tramos de carretera convencional. Como resultado, se analizó la velocidad en un total de 105 curvas y 59 rectas.

Los resultados muestran que las variables más influyentes en la velocidad desarrollada en curvas son el radio de la propia curva y la pendiente, mientras que en rectas son la velocidad mínima de la curva anterior, la longitud y la pendiente longitudinal de la recta. Además, se han identificado dos tendencias significativamente diferentes relacionadas con los camiones cargados, que presentaron una velocidad menor a los camiones descargados.

Los nuevos modelos han sido comparados con aquellos desarrollados anteriormente por otros investigadores o propuestos en guías de diseño de carreteras.

Palabras claves: modelos de velocidad, velocidad de operación, vehículos pesados, diseño geométrico de carreteras

ABSTRACT

Road safety is one of the major concerns in our society. There are three main concurrent factors in road crash occurrence: human, vehicle, and infrastructure factors.

The interaction between human and infrastructure factors has been deeply studied in the last years through the concept of geometric design consistency, which can be defined as how drivers' expectations and road behavior fit.

To this regard, a consistent road means that road users are not surprised while driving along it. On the contrary, an inconsistent road design may produce surprises on drivers leading to anomalous behavior and increasing the likelihood of crash occurrence.

Geometric design consistency is usually assessed considering only passenger cars due to the few speed prediction models for heavy vehicles. However, the interaction between both types of vehicles is a key factor on road safety.

Therefore, the main objective of this research was to analyze and model the free flow speed developed by heavy vehicles on horizontal curves and tangents of two-lane rural roads.

Different speed models were developed for heavy vehicles on horizontal curves and tangents from continuous speed profiles collected using Global Positioning System (GPS) tracking devices on 12 two-lane rural road sections. As a result, 105 horizontal curves and 59 tangents were considered in the research.

The results showed that the most influential variables on horizontal curves were the radius and the grade at the point of curvature, whereas on tangents were the length, the longitudinal grade, and the speed of the preceding horizontal curve. In addition, two different trends were identified which were related to loaded and unloaded trucks.

The new speed models were compared with those models previously developed by other researchers or proposed in different geometric design guidelines.

Keywords: speed model, operating speed, trucks, two-lane rural roads, geometric design

RESUM

La seguretat viària és una de les principals preocupacions en la nostra societat. Tres són els principals factors concurrents en la sinistralitat: el factor humà, el vehicle i la infraestructura.

La interacció entre el factor humà i la infraestructura es estudiada a través de la consistència del disseny geomètric, la qual es defineix com el grau d'adequació entre les expectatives dels conductors i el comportament de la carretera.

D'esta manera, un baix nivell de consistència del disseny geomètric pot portar a que els conductors es vegin sorpresos davant de certes configuracions incrementant la probabilitat d'ocurrència d'accidents.

La consistència del disseny geomètric de carreteres es avaluada normalment a través de l'anàlisi de la velocitat d'operació dels vehicles lleugers a causa dels pocs models per a estimar la velocitat d'operació dels vehicles pesats. No obstant això, la interacció entre ambdós tipus de vehicles és un factor clau en la seguretat viària.

Per això, l'objectiu principal del present treball d'investigació va ser analitzar i modelitzar la velocitat en flux lliure desenvolupada per vehicles pesats en corbes horitzontals i rectes de carreteres convencionals.

Els models van ser calibrats a partir de perfils de velocitat continus obtinguts per mitjà de dispositius GPS en un total de 12 seccions de carretera convencional. Com resultat, es va analitzar la velocitat en un total de 105 corbes horitzontals i 59 rectes.

Els resultats van mostrar que les variables més influents en la velocitat desenvolupada en corbes horitzontals van ser el radi de la corba horitzontal i el pendent en el punt de curvatura, mentre que en rectes ho van ser la velocitat de la corba anterior i la longitud i pendent longitudinal de la recta. A més, es van identificar dos tendències significativament diferents relacionades amb els camions carregats i descarregats.

Els nous models desenvolupats per a corbes horitzontals i rectes es van comparar amb aquells models calibrats anteriorment per altres investigadors o proposats en diverses guies de disseny de carreteres.

Paraules claus: models de velocitat, velocitat d'operació, vehicles pesats, carreteres convencionals, disseny geomètric de carreteres

ÍNDICE GENERAL

1	ANTECEDENTES.....	1
2	INTRODUCCIÓN.....	3
3	ESTADO DEL ARTE	7
3.1	VELOCIDAD	7
3.1.1	Velocidad de diseño	7
3.1.2	Velocidad de proyecto.....	9
3.1.3	Velocidad de operación.....	10
3.1.4	Velocidad específica.....	10
3.1.5	Velocidad límite	11
3.1.6	Velocidad deseada.....	11
3.2	SINIESTRALIDAD.....	12
3.3	MÉTODOS Y MODELOS PARA ESTIMAR LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN	14
3.3.1	Vehículos ligeros	15
3.3.2	Vehículos pesados	28
3.4	CONSIDERACIONES FINALES.....	41
3.4.2	Tamaño de muestra	42
3.4.3	Metodología de toma de datos.....	43
4	OBJETIVOS E HIPÓTESIS	45
5	METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL	47
5.1	METODOLOGÍA	47
5.2	TOMA DE DATOS	48
5.3	RESTITUCIÓN GEOMÉTRICA DE LOS TRAMOS.....	49
5.4	OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LA VELOCIDAD	53

5.5	VARIABLES CONSIDERADAS	54
5.6	SELECCIÓN DE CURVAS	56
5.7	SELECCIÓN DE LA RECTAS	58
6	ANÁLISIS.....	61
6.1	ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN CURVAS ...	61
6.1.1	Análisis del tamaño de muestra en curvas.....	63
6.1.2	Análisis descriptivo: velocidad del percentil 85	66
6.1.3	Análisis descriptivo: velocidad media	73
6.1.4	Análisis descriptivo: velocidad del percentil 15	79
6.2	ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN RECTAS ...	84
6.2.1	Análisis del tamaño de muestra en rectas.....	85
6.2.2	Análisis descriptivo: velocidad del percentil 85	86
6.2.3	Análisis descriptivo: velocidad media	94
6.2.4	Análisis descriptivo: velocidad del percentil 15	99
7	DESARROLLO DE MODELOS DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN	105
7.1	MODELOS PARA CURVAS	105
7.1.1	Modelización de la velocidad del percentil 85	105
7.1.2	Modelización de la velocidad media	112
7.1.3	Modelización de la velocidad del percentil 15	114
7.2	MODELOS PARA RECTAS.....	115
7.2.1	Modelización de la velocidad del percentil 85	116
7.2.2	Modelización de la velocidad media	120
7.2.3	Modelización de la velocidad del percentil 15	122
8	DISCUSIÓN.....	125
8.1	VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN CURVAS.....	125

8.1.1	Velocidad mínima en curvas	125
8.1.2	Rango y tamaño de la muestra en curvas.....	125
8.1.3	Influencia del trazado en planta.....	126
8.1.4	Influencia del trazado en alzado.....	127
8.2	VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN RECTAS	129
8.2.1	Velocidad máxima en rectas	129
8.2.2	Influencia del trazado	130
8.2.3	Rango y tamaño de la muestra en rectas.....	132
8.3	VELOCIDAD DE VEHÍCULOS LIGEROS VERSUS VELOCIDAD DE VEHÍCULOS PESADOS.....	133
9	CONCLUSIONES.....	137
10	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	143
	AGRADECIMIENTOS	145
	CONCLUSIÓN	147
	REFERENCIAS.....	148
	ANEXO I: PUBLICACIONES DEL TFM	
	ANEXO II: CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS TRAMOS	
	ANEXO III: PERFILES CONTINUOS DE VELOCIDAD DE LOS TRAMOS	
	ANEXO IV: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS CURVAS	
	ANEXO V: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICA DE LAS RECTAS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Modelos para la estimación de la velocidad de operación de vehículos pesados de Donnell et al. (2001).....	32
Tabla 3.2 Modelos para la estimación de la velocidad de operación en el punto de tangencia de Jacob y Anjaneyulu (2012).....	33
Tabla 3.3 Modelos para la estimación de la velocidad de operación en el punto medio de la curva de Jacob y Anjaneyulu (2012).....	34
Tabla 3.4 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en curvas.....	42
Tabla 3.5 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en rectas	43
Tabla 5.1 Tramos de estudio.....	53
Tabla 5.2 Características geométricas de las curvas utilizadas en el estudio ..	57
Tabla 5.3 Características geométricas de las rectas utilizadas en el estudio ...	59
Tabla 6.1 Comparación de datos pareados $V_{85\text{ctro}}$ vs. $V_{85\text{min}}$	62
Tabla 6.2 Comparación de datos pareados $V_{m\text{ctro}}$ vs. $V_{m\text{min}}$	63
Tabla 6.3 Comparación de datos pareados $V_{15\text{ctro}}$ vs. $V_{15\text{min}}$	63
Tabla 6.4 Tamaño de la muestra necesaria para las curvas	64
Tabla 6.5 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 85: camiones cargados	67
Tabla 6.6 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 85: camiones descargados.....	68
Tabla 6.7 Matriz de correlación de la velocidad del media: camiones cargados	75
Tabla 6.8 Matriz de correlación de la velocidad del media: camiones descargados.....	76
Tabla 6.9 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 15: camiones cargados	81
Tabla 6.10 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 15: camiones descargados.....	82

Tabla 6.11 Tamaño de la muestra necesaria para las rectas	85
Tabla 6.12 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 85: camiones cargados	89
Tabla 6.13 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 85: camiones descargados.....	90
Tabla 6.14 Matriz de correlación de la velocidad media: camiones cargados..	95
Tabla 6.15 Matriz de correlación de la velocidad media: camiones descargados	96
Tabla 6.16 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 15: camiones cargados	101
Tabla 6.17 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 15: camiones descargados.....	102
Tabla 7.1 Modelos de regresión para estimar la V_{85} de camiones cargados..	106
Tabla 7.2 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones cargados	109
Tabla 7.3 Modelo de regresión para estimar la V_{85} de camiones descargados	110
Tabla 7.4 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones descargados.....	112
Tabla 7.5 Modelos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados.....	113
Tabla 7.6 Modelos compuestos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados	113
Tabla 7.7 Modelos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados.....	114
Tabla 7.8 Modelos compuestos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados	115
Tabla 7.9 Modelos para la estimación de la V_{85} de camiones cargados	116
Tabla 7.10 Modelos compuestos para la estimación de la V_{85} de camiones cargados en rectas.....	117

Tabla 7.11 Modelos de regresión para estimar la V_{85} de camiones descargados	118
Tabla 7.12 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones descargados.....	120
Tabla 7.13 Modelos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados.....	121
Tabla 7.14 Modelos compuestos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados	121
Tabla 7.15 Modelos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados.....	122
Tabla 7.16 Modelos compuestos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados	123
Tabla 8.1 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en curvas.....	126
Tabla 8.2 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en rectas	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Localización de puntos en toma de datos puntuales en curvas.....	21
Figura 3.2 Ábaco de deceleración para un vehículo pesado tipo 120 kg/kW desde 110 km/h.....	35
Figura 3.3 Ábaco de aceleración para un vehículo pesado tipo 120 kg/kW desde 110 km/h.....	36
Figura 3.4 Ábaco de aceleración y deceleración para un vehículo pesado tipo 120 kg/kW desde 100 km/h.....	37
Figura 3.5 Ábaco de aceleración y deceleración para un vehículo pesado tipo 120 kg/kW desde 80 km/h.....	37
Figura 3.6 Curvas de velocidad de operación de vehículos pesados con relación peso/potencia igual a 60 kg/kW.....	38
Figura 3.7 Curvas de velocidad de operación de vehículos pesados con relación peso/potencia igual a 120 kg/kW.....	39
Figura 3.8 Curvas de velocidad de operación de vehículos pesados con relación peso/potencia igual a 180 kg/kW.....	40
Figura 5.1 Metodología de la investigación.....	48
Figura 5.2 Dispositivo GPS	49
Figura 5.3 Camión tipo bañera	49
Figura 5.4 Polilínea sobre el eje de la calzada con baja densidad de puntos...	50
Figura 5.5 Representación del eje sobre la ortofoto	51
Figura 5.6 Identificación de elementos geométricos en REVEL	51
Figura 5.7 Ajuste de la geométrica en REVEL.....	52
Figura 5.8 Estados de alineaciones	52
Figura 5.9 Ejemplo de circulación condicionada	53
Figura 5.10 Perfil de velocidad del tramo CV-425: Buñol – Alborache	54
Figura 5.11 Tramificación según el CCR, tramo CV-610: Genovés - Cuatretont	56

Figura 5.12 Selección de curvas	57
Figura 5.13 Selección de rectas	58
Figura 6.1 Ejemplo $V_{85\text{ctro}}$ vs. $V_{85\text{min}}$ del tramo CV-425: Buñol - Alborache	62
Figura 6.2 Velocidad del percentil 85 (V_{85}) vs. las variables geométricas del trazado en planta	70
Figura 6.3 Velocidad del percentil 85 (V_{85}) vs. la pendiente	72
Figura 6.4 Velocidad media (V_m) vs. las variables geométricas del trazado en planta	78
Figura 6.5 Velocidad media (V_m) vs. la pendiente.....	79
Figura 6.6 Velocidad del percentil 15 (V_{15}) vs. las variables geométricas del trazado en planta	83
Figura 6.7 Velocidad del percentil 15 (V_{15}) vs. la pendiente	84
Figura 6.8 Velocidad del percentil 85 (V_{85}) vs. las variables geométricas del trazado en planta	92
Figura 6.9 Velocidad del percentil 85 (V_{85}) vs. la pendiente	93
Figura 6.10 Velocidad media (V_m) vs. las variables geométricas del trazado en planta	98
Figura 6.11 Velocidad media (V_m) vs. La pendiente	99
Figura 6.12 Velocidad del percentil 15 (V_{15}) vs. las variables geométricas del trazado en planta	103
Figura 6.13 Velocidad del percentil 15 (V_{15}) vs. La pendiente	104
Figura 7.1 Modelos de regresión para estimar la V_{85} de camiones cargados	107
Figura 7.2 Análisis de residuos vs. pendiente para camiones cargados	109
Figura 7.3 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones cargados	110
Figura 7.4 Modelo para estimar la V_{85} de camiones descargados	111
Figura 7.5 Análisis de residuos vs. pendiente para camiones descargados...	111
Figura 7.6 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones descargados.....	112

Figura 7.7 Modelos compuestos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados en curvas	114
Figura 7.8 Modelos compuestos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados en curvas	115
Figura 7.9 Modelos para la estimación de la V_{85} de camiones cargados	116
Figura 7.10 Análisis de residuos vs. pendiente para camiones cargados	117
Figura 7.11 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones cargados	118
Figura 7.12 Modelos de regresión para estimar la V_{85} de camiones descargados.....	119
Figura 7.13 Análisis de residuos vs. V_{85mcp}	119
Figura 7.14 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones descargados.....	120
Figura 7.15 Modelos compuestos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados en rectas	122
Figura 7.16 Modelos compuestos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados en rectas	123
Figura 8.1 Modelos de velocidad del percentil 85 vs. modelo de Jacob y Anjaneyulu	127
Figura 8.2 Comparación entre los modelos para estimar la V_{85} y V_{15} para camiones cargados y descargados en curvas.....	129
Figura 8.3 Ábaco de aceleración y deceleración para un vehículo pesado tipo 120 kg/kW desde 80 km/h (Norma 3.1-I.C, 2016).....	132
Figura 8.4 V_{85C} y V_{85D} vs. V_{85L} en curvas	134
Figura 8.5 V_{85D} vs. V_{85L} en rectas.....	135

1 ANTECEDENTES

La presente investigación se presenta como Trabajo de Fin de Máster del alumno Brayan Duwan González Hernández, para la obtención del título de Máster en Transporte, Territorio y Urbanismo.

Está dirigida por el Doctor Alfredo García García, Catedrático del Departamento de Ingeniería e Infraestructuras de los Transportes de la Universitat Politècnica de València como tutor principal, por la Doctora Ana María Pérez Zuriaga, Profesor Contratado Doctor del mismo Departamento como cotutora y el Doctorando David Llopis Castelló, investigador del mismo Departamento como director experimental.

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de investigación “CASEFU – Estudio experimental de la funcionalidad y seguridad de las carreteras convencionales” (TRA2013-42578-P), subvencionado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España y el Fondo Social Europeo, y fue realizado con la colaboración directa del Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), perteneciente al Instituto del Transporte y Territorio de la Universitat Politècnica de València.

2 INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2016), los accidentes de tráfico forman parte de las 10 principales causas de pérdidas humanas en todo el mundo. Cada año mueren aproximadamente 1,25 millones de personas como consecuencia de accidentes de tráfico. Asimismo, entre 20 y 50 millones de personas sufren traumatismos no mortales, y a su vez una proporción de estos padece alguna forma de discapacidad.

En España, se produjeron un total de 1.291 víctimas mortales en vías interurbanas durante el año 2016. De igual forma, más del 70% de los accidentes de tráfico en vías interurbanas, se ocasionaron en carreteras convencionales (DGT, 2016). Además, las carreteras convencionales representan alrededor del 90% de la red de carreteras del país, lo que hace que las mismas cobren un papel muy importante en lo que se refiere a la seguridad vial.

Las lesiones causadas por los accidentes de tráfico ocasionan pérdidas económicas considerables para las víctimas, sus familias y los países en general. Se producen pérdidas a consecuencia de los costos del tratamiento (incluidas la rehabilitación y la investigación del accidente), la pérdida o disminución de la productividad (por ejemplo, en los sueldos) por parte de quienes resultan muertos o heridos, y el tiempo invertido por familiares para atender a los heridos (OMS, 2016).

Tres son los principales factores concurrentes en la siniestralidad: el factor humano, el vehículo y la infraestructura. Este último está presente en el 34% de los accidentes en carretera (Highway Safety Manual, 2010).

La interacción entre el factor humano y la infraestructura ha sido estudiada recientemente a través de la consistencia del diseño geométrico, la cual se define como el grado de adecuación entre las expectativas de los conductores y el comportamiento de la carretera.

De esta manera, un bajo nivel de consistencia del diseño geométrico puede llevar a que los conductores se vean sorprendidos ante ciertas configuraciones de la misma, incrementando la probabilidad de ocurrencia de accidentes.

La consistencia del diseño geométrico de carreteras es evaluada comúnmente a través del análisis de la velocidad de operación. Esta velocidad es definida por la AASHTO (2011) como “la velocidad a la cual los conductores operan con sus vehículos en condiciones de flujo libre” y es llevada a la práctica comúnmente mediante el percentil 85 de la distribución de velocidad desarrollada por vehículos ligeros en condiciones de flujo libre y sin restricciones ambientales.

Este parámetro puede obtenerse a partir de mediciones en campo durante la fase de explotación de una carretera. Sin embargo, en la fase de diseño únicamente puede estimarse. En este sentido, se han desarrollado distintos modelos de estimación de la velocidad de operación que relacionan este parámetro con las características geométricas de los elementos de la carretera.

Varias investigaciones se han centrado en la calibración de modelos de velocidad de operación para vehículos ligeros, mientras que el número de modelos para la estimación de la velocidad de operación de vehículos pesados es muy reducido (Jacob y Anjaneyulu, 2012).

Además, los manuales de diseño geométrico consideran en menor medida la importancia de los vehículos pesados. Por ejemplo, el *Green Book* de la AASHTO (2011) tiene en cuenta los vehículos pesados para el diseño del firme, carriles de cambio de velocidad, peralte y la deceleración en rampas y pendientes, mientras que la Instrucción de diseño geométrico de carreteras de España, solo considera los vehículos pesados para el diseño del firme y los carriles de cambio de velocidad.

Leisch y Leisch (1977) recomendaron para la obtención de un diseño geométrico consistente una diferencia máxima de 15 km/h entre la velocidad de operación de los vehículos ligeros y los pesados en un determinado elemento geométrico. Asimismo, Harwood et al. (2003) subrayó que el diferencial de velocidad entre los vehículos ligeros y pesados puede producir que la operación de los vehículos en tramos de fuerte pendiente sea inconsistente.

La mayor parte de los modelos de velocidad para vehículos pesados desarrollados se han basado en observaciones puntuales de la velocidad medidos principalmente en el punto inicial, medio y final de las curvas y en puntos concretos de la recta anterior, asumiendo en muchos casos que la deceleración se produce únicamente en el tramo recto y que la velocidad en la curva se mantiene constante. En este sentido, disponer de datos continuos de la velocidad permitiría comprobar estas hipótesis y calibrar modelos de velocidad más precisos.

Asimismo, la mayoría de los modelos se basan en el trazado en planta. Sin embargo, Leisch y Leisch (1977), Al-Maseid et al. (1995) y Morris y Donnell (2014) concluyeron que la pendiente ascendente de la carretera, que no tiene un efecto significativo en los vehículos ligeros, ocasiona en los vehículos pesados altas tasas de deceleración y, por tanto, reducciones de la velocidad muy bruscas.

Por otra parte, Saifizul et al. (2011) concluyeron que el tipo de vehículo tiene un efecto significativo en la velocidad pero sólo en el caso en que el tamaño de los vehículos es significativamente diferente. En el caso en que los vehículos son

similares en tamaño pero difieren en número de ejes, el peso es el factor dominante. En este sentido, también debe considerarse la posible variación de la velocidad de los vehículos pesados debida a la influencia de la carga variable que pueden transportar.

Así, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal la calibración de modelos de velocidad, para vehículos pesados en curvas y rectas a partir de la observación naturalística de perfiles de velocidad continuos a través de dispositivos GPS de 1 Hz en 12 tramos de carretera convencional ubicados en la Comunidad Valenciana.

Por último, el estudio no se ha centrado únicamente en la velocidad de operación, entendida como el percentil 85 de la distribución de velocidad en flujo libre, sino en el estudio de la distribución completa. Se precisa este estudio completo ya que los percentiles bajos, como el percentil 15, están relacionados con el riesgo de alcance de vehículos ligeros.

3 ESTADO DEL ARTE

En el presente apartado se muestra la revisión bibliográfica del conocimiento acumulado en el campo concreto de estudio, es decir, sobre el análisis de la velocidad desarrollada por vehículos pesados en carreteras convencionales. Esto supondrá la base teórica y punto de partida.

El desarrollo de este estado del arte comienza con una visión general de los distintos conceptos de velocidad. Posteriormente, se realiza una descripción general de la siniestralidad centrada en la influencia de la infraestructura en la seguridad vial y la relación entre los vehículos ligeros y los vehículos pesados en la producción de accidentes.

A continuación, se presentan los métodos y modelos más representativos de velocidad de operación, tanto para vehículos ligeros como para vehículos pesados, distinguiendo entre modelos para la estimación de la velocidad en curvas y en rectas.

Finalmente, la última sección del estado del arte concluye con las consideraciones finales, que resumen las limitaciones del conocimiento actual y suponen una ventana de oportunidad para las cuestiones a investigar.

3.1 VELOCIDAD

La velocidad que pueden desarrollar los conductores a lo largo de la vía, conocida como velocidad de operación, está estrechamente relacionada con la geometría de la carretera, por lo que es un factor básico a tener en cuenta en el diseño de carreteras. Por tanto, a continuación se profundiza en este concepto y se presenta una visión general de los distintos conceptos relacionados con la velocidad.

3.1.1 Velocidad de diseño

Actualmente el concepto generalizado es el determinado por la AASHTO (2004), que define la velocidad de diseño como *“una velocidad seleccionada para diseñar determinados aspectos de la vía”*. Aunque el concepto fue inicialmente desarrollado en la década de 1930 en EE.UU. como un mecanismo para diseñar carreteras convencionales en planta, a través del tiempo el concepto y el modo en el cual se tiene en cuenta en el diseño de carreteras ha ido cambiando.

De esta manera, respecto a la selección de una velocidad de diseño adecuada, la AASHTO (2004) señala lo siguiente:

- La velocidad de diseño asumida deberá ser congruente con la topografía, los usos del suelo adyacente y la clasificación funcional de la vía.
- Excepto para carreteras locales, se deberá realizar el mayor esfuerzo posible para conseguir el deseado grado de seguridad, movilidad y eficiencia dentro de los condicionantes externos.
- La velocidad de diseño elegida debería ser consistente con la velocidad que un conductor espera del entorno, ya que este acepta de mejor grado un descenso de la velocidad impuesto cuando los condicionantes externos sugieren la necesidad de dicha disminución mejor que cuando no la justifican.
- Una vía de mayor clasificación funcional puede justificar una mayor velocidad de diseño que una de menos importancia, bajo condiciones de topografía similar. Un diseño de baja velocidad de diseño, en cambio, no debería emplearse en una carretera secundaria cuya topografía permite que los conductores viajen a altas velocidades. Esto es debido a que los conductores no ajustan su velocidad a la clasificación funcional de la carretera, sino a las condiciones del entorno.
- La velocidad seleccionada para el diseño deberá ajustarse a los hábitos y expectativas de la mayoría de los conductores.
- Otro factor que se puede considerar en la selección de las velocidades de diseño es la longitud media del viaje. A mayor distancia a recorrer, los conductores desean más movimiento.
- Una vez seleccionada, todos los factores de las vías deberían referirse a la velocidad de diseño para conseguir un diseño congruente.
- Deberían usarse valores superiores a los mínimos siempre que sea posible, pero teniendo en cuenta las condiciones externas que pueden imposibilitar o hacer poco recomendable esta recomendación.
- Aunque la velocidad de diseño establece el radio máximo de la transición y distancia mínima de visibilidad necesaria por seguridad, no hay restricción en el uso de curvas más amplias o mayores distancias de seguridad allá donde las mejoras puedan introducirse como una parte de un diseño económico. Incluso en terreno accidentado una recta ocasional o transición alargada es deseable. Ello no implica necesariamente inducir a los conductores a acelerar (en caso de que se recurra a esta solución de forma sistemática sí lo inducirá, con lo cual el resto de elementos del trazado deberán referirse a esta nueva velocidad superior).
- Es deseable asumir una única velocidad de diseño en una longitud importante de vía siempre que sea posible. El terreno, además de otros condicionantes físicos, puede imponer un cambio en la velocidad de diseño en determinados tramos. En estos casos, el cambio en la velocidad de diseño no debe ser impuesto de forma brusca, sino

paulatinamente con el objetivo de que los conductores, de forma inconsciente, vayan adaptando sus velocidades de operación a la de diseño.

3.1.2 Velocidad de proyecto

En España la Instrucción de Trazado 3.1-IC (2016) denomina las carreteras en función de su velocidad de proyecto (término equivalente a la velocidad de diseño) y su clasificación funcional. De este modo distingue los siguientes tipos de carreteras:

- Autopistas y autovías: A-140, A-130, A-120, A-110, A-100, A-90, A-80
- Carretera multicarril y carretera convencional: C-100, C-90, C-80, C-70, C-60, C-50 y C-40

De igual forma clasifica las vías en los siguientes grupos:

- Grupo 1: Autopistas y autovías A-140 y A-130
- Grupo 2: Autopistas y autovías A-120, A-110, A-100, A-90 y A-80 y carreteras C-100
- Grupo 3: Carreteras C-90, C-80, C-70, C-60, C-50 y C-40

En donde la letra es A para las autopistas y autovías, y C para las carreteras convencionales y las carreteras multicarril; el número representa la velocidad de proyecto, elegida durante la fase de diseño y entendida como la velocidad que permite definir las características geométricas mínimas de los elementos del trazado, en condiciones de comodidad y seguridad. De esta forma, la velocidad de proyecto guarda relación directa con el diseño del trazado del tramo correspondiente. Esta velocidad se identifica con la velocidad específica mínima del conjunto de elementos que forman el tramo.

Aunque la Instrucción de Trazado (2016) no impone condiciones específicas a la hora de seleccionar la velocidad de proyecto, sí establece ciertas recomendaciones para su elección y adecuación al entorno, en general definidas en los estudios de carreteras correspondientes, en función de los siguientes factores:

- Condiciones topográficas y del entorno.
- Características ambientales.
- Consideración de la función de la vía dentro del sistema de transporte por carretera.
- Homogeneidad del itinerario.
- Condiciones económicas.
- Distancias entre conexiones o accesos y sus tipologías.

3.1.3 Velocidad de operación

La AASHTO (2004) define la velocidad de operación como “la máxima velocidad media a la que un conductor puede circular en una sección dada de vía bajo condiciones favorables de meteorología, condiciones predominantes de tráfico y sin exceder la velocidad segura en ningún momento, determinada esta mediante la velocidad de diseño basada en un análisis por tramos de la vía”.

La anterior definición no posibilita ninguna aplicación práctica en el diseño de carreteras, por lo que para su aplicación usualmente se recurre al percentil 85 de la distribución de velocidades a la que operan los vehículos ligeros en condiciones de circulación libre y sin restricciones ambientales.

El componente más importante de la velocidad de operación, es identificar la velocidad que los usuarios adquieren a lo largo de la vía. Esta velocidad es un valor que se desarrollará en la vía una vez construida, y, por tanto, no puede ser conocida a priori en la fase de diseño de la misma. Sin embargo, se ha comprobado cómo esta velocidad de operación, pese a su carácter empírico, puede ser estimada con mayor o menor fiabilidad desde la fase de diseño.

Numerosos son los estudios encaminados a identificar las variables que más afectan a la velocidad de operación, y a partir de ellos desarrollar diversos métodos con el objetivo de que el diseñador pueda estimar dicha velocidad. Entre ellos son fundamentales los que estiman la velocidad de operación en curvas (principalmente en función del radio), en rectas, o considerando también el alzado.

A la representación gráfica de la velocidad de operación en función del PK recorrido se le conoce por el nombre de “perfil de velocidad de operación”, y también existen diversos modelos (modelos de perfil de velocidad de operación) que lo configuran generalmente en función de diversos modelos de velocidad de operación para elementos de trazado aislados. Este tema, es desarrollado más adelante en el presente estado del arte.

3.1.4 Velocidad específica

La Instrucción de Trazado 3.1 I-C (2016) de España, define un equivalente a la velocidad de operación: la velocidad específica de cada uno de los elementos del trazado, como una aproximación a las velocidades de operación para deducir de ellas las de diseño. Este concepto de velocidad se utiliza en España desde los años sesenta.

La velocidad específica de un elemento de trazado se define como la máxima velocidad que puede mantenerse a lo largo de un elemento de trazado considerado aisladamente, en condiciones de seguridad y comodidad, cuando

encontrándose el pavimento húmedo y los neumáticos en buen estado, las condiciones meteorológicas, del tráfico y legales son tales que no imponen limitaciones a la velocidad.

En función del valor asignado a esta velocidad se definen las distintas características de un determinado elemento del trazado.

3.1.5 Velocidad límite

El Report 439 del NCHRP del año 2000, recomienda establecer la velocidad límite con base en el percentil 85 de la velocidad de operación estimada.

Los métodos empleados para establecerla han sido estudiados por diversos autores, siendo las conclusiones de un estudio elaborado por el Institute of Transportation Engineers (ITE) (1993) las siguientes:

- El percentil 85 de la velocidad de operación es un factor fundamental a la hora de establecer los límites de velocidad. De igual modo, se consideran otros factores (aunque en menor medida), como la geometría de la vía y la tasa de siniestralidad, además del desarrollo externo a la vía (se considera menos).
- Los tres factores más empleados en establecer la velocidad límite de una vía sin tener en cuenta las características de operación fueron la geometría de la vía, la tasa de siniestralidad, y la presión política.
- La mayoría de administraciones permiten desviaciones de la velocidad de operación, siendo la mayoría entre 5 y 10 mph. Las razones para esta desviación incluyen razones políticas, accidentes, etc.

Existen de igual modo recomendaciones “pseudo-empíricas” para establecer ciertas velocidades límite a diferentes vías a la hora de su diseño.

3.1.6 Velocidad deseada

La velocidad deseada es una variable auxiliar y no directamente medible, empleada por algunos modelos para la predicción de velocidades de operación locales. Su definición es la velocidad que el conductor desea mantener cuando la geometría y otras variables (como la visibilidad) no le coartan. Es por ello que suele estimarse como la velocidad que presenta el vehículo en rectas largas (entendidas estas como rectas durante las cuales el conductor alcanza y posteriormente mantiene la velocidad), ya que no existen variables que permitan directamente su cálculo.

McLean (1979) ofreció una de las primeras definiciones de velocidad deseada, en los siguientes términos: *“la velocidad a la que los conductores eligen viajar en condiciones de flujo libre, cuando no están coartados por las características del trazado”*. Además concluyó que esta velocidad estaba influenciada por

factores como el propósito del viaje, la proximidad a áreas urbanas, o el tiempo que llevaba en la carretera.

El Highway Capacity Manual (2016) sugiere ajustes a la velocidad de flujo libre basada en la anchura del carril, visibilidad lateral, número de carriles y número de intercambios, es decir, parámetros que tienen influencia sobre la velocidad de operación pero que difícilmente son medibles y/o cuantificables.

3.2 SINIESTRALIDAD

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2016), los accidentes de tráfico hacen parte de las 10 principales causas de pérdidas humanas en todo el mundo. Cada año se pierden aproximadamente 1,25 millones de vidas a consecuencia de los accidentes de tráfico. Entre 20 y 50 millones de personas sufren traumatismos no mortales, y a su vez una proporción de estos padecen alguna forma de discapacidad.

Las lesiones causadas ocasionan pérdidas económicas considerables para las víctimas, sus familias y los países en general. Se producen pérdidas a consecuencia de los costos del tratamiento (incluidas la rehabilitación y la investigación del accidente) y de la pérdida o disminución de la productividad (por ejemplo, en los sueldos) por parte de quienes resultan muertos o lastimados, y para los miembros de la familia que deben destinar tiempo del trabajo o la educación para atender a los lesionados (OMS, 2016).

En este sentido, tres son los principales factores concurrentes en la siniestralidad: el factor humano, el vehículo y la infraestructura. Una de las principales razones relacionadas con la infraestructura es la baja consistencia del diseño geométrico, la cual produce que la geometría de la vía no se ajuste a las expectativas de los conductores y, por tanto, que estos puedan verse sorprendidos ante ciertas configuraciones de la misma, dando como resultado un incremento en el número de accidentes.

De esta forma, se han llevado a cabo diferentes estudios sobre la consistencia del diseño geométrico de carreteras. La consistencia del diseño geométrico ha sido abordada a partir de cuatro áreas principalmente: velocidad de operación, estabilidad vehicular, índices del trazado y la carga de trabajo del conductor (Ng y Sayed, 2004).

En un estudio desarrollado por Anderson et al. (1999) en Estados Unidos, establecieron la relación entre la reducción de velocidad al iniciar una curva y la siniestralidad, así como entre los siguientes índices de trazado y la siniestralidad: el radio promedio, la relación entre el radio medio y el radio mínimo, la tasa promedio de curvatura vertical y la relación entre radio y el radio promedio. Los estudios estadísticos desarrollados permitieron establecer

que cuatro de los cinco aspectos analizados tiene relación estadística significativa con la frecuencia de accidentes.

Como se ha indicado en epígrafes anteriores, la velocidad de operación es definida por la AASHTO como “la velocidad a la cual los usuarios de la vía pueden conducir sus vehículos bajo condiciones de flujo libre”. En la práctica, esta velocidad se asocia con el percentil 85 de la distribución de velocidades a la que operan los vehículos ligeros en condiciones de flujo libre y sin restricciones ambientales.

Esta velocidad es un buen indicador del comportamiento de los conductores y, además, puede ser estimada con mayor o menor precisión mediante modelos de velocidad. En este sentido, son muchas las investigaciones llevadas a cabo para determinar las variables que más influyen en la velocidad de operación, y en base a éstas se han desarrollado multitud de modelos con el objetivo de que el diseñador pueda estimar dicha velocidad antes de construir la infraestructura.

Varias investigaciones se han centrado en calibrar modelos de velocidad de operación para vehículos ligeros, mientras el número de modelos para la estimación de la velocidad de operación de vehículos pesados es muy reducido (Donnell et al., 2001).

Además, los manuales de diseño geométrico consideran en menor medida la importancia de los vehículos pesados. Así por ejemplo, el *Green Book* de la AASHTO (2011) tiene en cuenta los vehículos pesados para el diseño del firme, carriles de cambio de velocidad, peralte y la deceleración en rampas y pendientes, mientras que la Instrucción de diseño geométrico de carreteras de España (2016), solo considera los vehículos pesados para el diseño del firme y los carriles de cambio de velocidad.

Leisch y Leisch (1977) recomendaron para la obtención de un diseño geométrico consistente una diferencia máxima de 15 km/h entre la velocidad de operación de los vehículos ligeros y los pesados desarrollada en un determinado elemento. Mientras Harwood et al. (2003) subrayó que el diferencial de velocidad entre los vehículos ligeros y pesados puede producir que la operación de los vehículos en tramos de fuerte pendiente sea inconsistente.

Asimismo, la velocidad puede ser un factor aún más crítico para la seguridad de los vehículos pesados que para los vehículos en general (Brooks, 2002). Esto se debe a que, a diferencia de los vehículos ligeros, los vehículos pesados tienen sistemas más complicados con una variedad de posibles modos de falla y características de rendimiento que incluyen frenado con rueda bloqueada, balanceo del remolque, vuelco, características de aceleración deficientes y una distancia de frenado más larga. Además, como lo

mencionaron Fancher y Campbell (1995), el peso del vehículo pesado muestra una asociación más fuerte con las tasas de accidentes fatales entre todas las demás características del vehículo, como la distancia entre ejes, la configuración y el número de ejes.

Finalmente, según datos de la fundación Española para la Seguridad Vial (Fesvial), en España un camión recorre en promedio siete veces más kilómetros al año que un vehículo ligero. Eso explica que al año un 0,29 por ciento de los vehículos ligeros sufren un accidente, mientras ese porcentaje en los camiones aumenta considerablemente hasta el 0,92 por ciento.

3.3 MÉTODOS Y MODELOS PARA ESTIMAR LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN

El diseño geométrico de vías se ha basado tradicionalmente en la velocidad de proyecto y en la velocidad específica, asumiendo que los vehículos circulaban a esta velocidad o una inferior. Sin embargo, se ha comprobado que esto no ocurre y que la velocidad de operación es muy distinta. De esta manera, la tendencia en el diseño de carreteras es centrar el diseño de su trazado en la velocidad de operación estimada de los vehículos ligeros.

Desde finales de los años 70, se han desarrollado distintos métodos y modelos para estimar la velocidad de operación desarrollada por vehículos ligeros (V_{85}) en carreteras convencionales (McLean, 1981; Glennon et al., 1986; Lamm y Choueri, 1986; Ottesen, 1993; Ottesen y Krammes, 1994; McFadden y Elefteriadou, 1997; Passeti y Fambro, 1999; Castro et al., 2008; Pérez-Zuriaga et al., 2010; Castro et al., 2013), estos consisten en calcular la velocidad de operación tanto en secciones curvas, como en rectas y de estimar los ratios de deceleración y aceleración. El formato del modelo, las variables independientes y los coeficientes de regresión son sustancialmente diferentes de un modelo a otro.

Estas diferencias pueden ser el resultado del diverso comportamiento de los conductores de una región a otra. De igual forma los distintos métodos y modelos han sido desarrollados principalmente en Estados Unidos, Canadá, algunos países de Europa y recientemente en Colombia y China.

Entre los estudios desarrollados, existen diferentes modelos de estimación de las velocidades de operación. En este caso, se utilizará la clasificación que distingue entre los modelos discretos y continuos.

Los modelos discretos son aplicables a una alineación en particular (una curva, un acuerdo o una recta), y proporcionan un valor de velocidad de operación para dicha alineación. Generalmente, el resultado es un valor discreto, aunque algunos modelos discretos pueden proporcionar valores no uniformes.

Los modelos continuos, al contrario que los anteriores, no se aplican en una alineación en particular, sino en un tramo de vía compuesto por diferentes alineaciones vinculadas. Generalmente, se hace uso de modelos discretos, para unirlos según diferentes normas, configurando un perfil de velocidad continuo a lo largo de todo el trazado. De este modo, recibe el nombre de perfil de velocidad de operación, la representación gráfica de la estimación de las velocidades de operación a lo largo de cierto trazado.

De esta manera, la mayoría de modelos y métodos se han enfocado en estimar la velocidad de operación de vehículos ligeros (V_{85}), mientras el número de modelos para la estimación de la velocidad de operación de vehículos pesados es muy reducido (Donnell, 2001). Por ende, aunque el presente trabajo trata sobre el estudio de la velocidad desarrollada por vehículos pesados en carreteras convencionales, a continuación se presenta una visión general de los diferentes métodos y modelos que pueden encontrarse en la literatura, distinguiendo entre vehículos ligeros y pesados.

3.3.1 Vehículos ligeros

3.3.1.1 Modelización de las velocidades de operación en curvas

La mayor parte de los estudios realizados encaminados a establecer una relación entre las velocidades de operación y elementos discretos del trazado se centran sobre las curvas. Además son los modelos que mayor índice de correlación alcanzan, lo cual implica que los modelos finalmente desarrollados se ajustan mucho mejor a la realidad que los modelos empleados para otras alineaciones, como las rectas.

Lo anterior implica que se conocen con mayor profundidad en las curvas que en otro tipo de elementos cuáles son las variables de las que depende.

3.3.1.1.1 Variables condicionantes

Las variables utilizadas para los diferentes modelos se pueden clasificar entre las variables geométricas, los índices de trazado y variables no geométricas. Las variables geométricas están directamente relacionadas con las características del trazado de la carretera, mientras que los índices del trazado se definen a partir de la combinación de diferentes variables geométricas.

Para el estudio de las curvas los modelos suelen contar con la variable radio para explicar la variabilidad de la velocidad de operación. Sin embargo, los modelos más completos incluyen también otras variables, como el ángulo de deflexión o la longitud de la curva; e incluso, en ocasiones, variables no geométricas, como la velocidad en la recta anterior.

- Variables geométricas

- *Radio*

El radio (medido generalmente en metros) es la variable más influyente sobre la velocidad de operación en curvas.

La influencia de esta variable sobre la velocidad de operación generalmente es tomada en una relación lineal, aunque en algunas ocasiones también se encuentra de forma inversa, dentro de una potencia o en forma radical. En todos los casos el comportamiento es que a mayor radio, la velocidad de operación es mayor.

Según un estudio desarrollado por Fitzpatrick et al (2.000), la velocidad crece a medida que el radio crece, hasta que este alcanza un valor de entre 300 y 400 metros, donde parece estancarse.

- *Grado de curvatura*

Esta variable guarda relación directa con el radio, y por ello es indistinto emplear en las correlaciones una u otra. Esta es más empleada en los países anglosajones.

Según un estudio desarrollado por Ottesen y Krammes (2000), a menor radio de curvatura, la velocidad de operación aumenta. Para grados de curvatura de 4° o menos, la velocidad de operación permanece constante, lo que parece indicar que en estos casos los vehículos circulan por la curva a una velocidad similar a la que desarrollarían en una recta.

En los estudios analizados, las unidades utilizadas suelen ser grados sexagesimales (°) por 100 pies de arco.

- *Ángulo de deflexión*

Según un estudio desarrollado por Schurr et al. (2.002), para curvas de gran radio (superiores a 350 metros), se observa una disminución de las velocidades de operación a medida que el ángulo de deflexión aumenta. Esto se explica debido a que a medida que los conductores observan un mayor cambio en la orientación de la vía reducen sus velocidades.

Sin embargo, el efecto de esta variable en los modelos de velocidad de operación en curvas no es tan importante como en el caso del radio, incluso resultando estadísticamente insignificante en muchos otros estudios. Las unidades en las que suele medirse el ángulo de deflexión son los grados sexagesimales.

- *Longitud de la curva*

Se trata de una variable que puede obtenerse directamente combinando las dos anteriores, por lo que en muchos casos los modelos desarrollados no la incluyen. Su efecto sobre la velocidad de operación, al igual que en el caso del ángulo de deflexión, es de poca importancia comparado con el del radio, resultando su influencia en algunos estudios estadísticamente insignificante.

Según un estudio desarrollado por Ottesen y Krammes (2.000), se distingue un comportamiento diferente para grados de curvatura superiores e inferiores a 4°. Para grados de curvatura inferiores a 4°, las velocidades de operación aumentan a medida que la longitud de la curva aumenta, mientras que para grados de curvatura mayores las velocidades de operación disminuyen a medida que la longitud de la curva aumenta.

Este efecto puede interpretarse como que los conductores, con altos grados de curvatura, tienden a suavizar la curva y deceleran menos. Sin embargo, si la curva es de mayor longitud, tienen más tiempo para decelerar, con lo que la velocidad en el punto medio de la curva es menor.

Schurr et al. (2002) investigaron también el efecto de la longitud de la curva para casos en los que el radio era superior a 350 metros (equivalente al caso anterior de curvas de menor grado de curvatura), corroborando la conclusión anterior que a medida que la longitud de la curva aumenta, la velocidad de operación aumenta, explicándose dicho efecto en el hecho que los conductores, a medida que disponen de más longitud, tienden a encontrar una velocidad de operación a la que conducir con mayor confort.

La unidad en la que aparece la longitud en la mayoría de los modelos analizados es el metro.

- *Pendiente longitudinal*

Se trata de una variable poco estudiada por los modelos que se centran en el estudio de las velocidades de operación en curvas, principalmente debido a que se trata de una variable cuya definición pertenece al trazado en alzado.

Sin embargo, en los casos en los que sí se ha estudiado se suele llegar a la conclusión de que sí es influyente, especialmente cuando se combina con las variables ángulo de deflexión o longitud de la curva.

Debido a ello se suele acotar la validez de los modelos propuestos para curvas a un rango de pendiente longitudinal (habitualmente ± 4 %), empleando en el resto de casos modelos de perfiles de velocidad (incluyendo un modelo para el trazado en alzado) o modelos basados en combinaciones de la alineación en planta y en alzado.

En los casos en que el efecto de esta variable ha sido estudiado, se distinguen dos comportamientos (fuera del rango de validez de los modelos), según la pendiente sea superior o inferior a dicho rango:

- En pendiente ascendente, la velocidad parece no ser afectada significativamente hasta pendientes del 4%. A partir de ahí, sí se ve reducida de forma importante.
 - En pendiente descendente, no se observó diferencia estadística entre pendientes inferiores o superiores a -4%.
- *Pendiente de la recta precedente*

Esta es una de las variables no locales que pueden afectar las velocidades de operación en curvas. El comportamiento de esta variable es que a mayor pendiente en la entrada de la curva, la velocidad de operación es menor.

Esta variable ofrece grandes ventajas respecto a la pendiente de la curva y a la velocidad de la recta precedente. Por un lado, se emplea más esta variable en los modelos que la pendiente en la curva. Esto es debido a que como pendiente de la recta precedente se entiende la pendiente en el contacto de la recta anterior con la curva, mientras que la pendiente de la curva no es una variable constante a lo largo de la misma.

Respecto a la pendiente de la recta precedente, tiene la ventaja de ser una variable estrictamente geométrica, y por ello es conocida tanto en fase de diseño como de operación. Debido a las anteriores ventajas, y aunque no explique tanta variabilidad como la velocidad de la recta precedente, se emplea esta en más ocasiones.

- Índices de trazado
 - *Tasa de cambio de curvatura*

Representada por las siglas *CCR* por su nomenclatura en inglés “*Curvature Change Ratio*”. Índice que estima la curvatura media de una vía o su sinuosidad. Se puede emplear también como variable estimativa de la velocidad de operación. Para ello el índice *CCR* se aplica únicamente a una curva (incluyendo sus curvas de transición asociadas), y pasa a representarse como *CCRS*. La ecuación 1 muestra su cálculo.

$$CCR = \frac{|\sum \gamma|}{L} \quad (1)$$

Donde:

CCR: tasa de cambio de curvatura del tramo (gon/km)

γ : ángulo girado en el tramo (gon)

L : longitud del tramo (km)

- Variables no geométricas
 - Velocidad de la recta precedente

De todas las variables definidas hasta ahora, esta presenta diferencias sustanciales respecto al resto. Esta es una variable que no es intrínseca de la curva, que no es de tipo geométrico, y que debe ser estimada o medida (no puede conocerse con exactitud a priori).

Dichas diferencias fundamentales con las variables anteriores son las causantes también de que la variabilidad explicada por esta variable sea diferente de las anteriores, ya que, en principio, no está correlacionada con ninguna de ellas (al menos aparentemente).

Este hecho es debido a que en las curvas una gran parte de la variabilidad de su velocidad de operación viene explicada por parámetros locales. Sin embargo, si se quiere explicar más variabilidad en las curvas hay que recurrir a parámetros no locales, de los cuales el más estudiado es la velocidad en la recta precedente, ya que por lo que se ha demostrado, es el parámetro no local que más variabilidad consigue explicar.

La mayor dificultad de este aspecto radica en encontrar la velocidad de la recta precedente a emplear. El método más fiable consiste en determinar empíricamente la misma, aunque este aspecto, pese a ser el óptimo, no es factible cuando se trata de calibrar modelos en fase de diseño.

La otra opción consiste en determinar la velocidad de operación de la recta anterior mediante un modelo discreto de estimación de la velocidad de operación en rectas. Este método sí es válido en fase de proyecto, encontrándose el inconveniente en este caso de que este tipo de modelos se ajustan mucho menos a la realidad que los empleados para curvas.

Cabe indicar, de igual modo, que esta variable sólo debe emplearse en los casos en los que la recta anterior tenga la suficiente longitud como para que los vehículos puedan alcanzar velocidades similares a la deseada.

En caso de que la longitud sea menor, la propia curva estará ejerciendo un control sobre las velocidades, con lo que el parámetro estará mal empleado. En los estudios realizados, a mayor velocidad en la recta precedente, la velocidad en la curva es mayor.

- Velocidad límite

Se ha estudiado ligeramente el efecto de la velocidad límite sobre la velocidad de operación en curvas. Se trata, según los estudios realizados, de una variable poco influyente. A medida que esta aumenta, la velocidad de operación tiende a aumentar.

3.3.1.1.2 Modelos para la estimación de las velocidades de operación en curvas

Para su desarrollo se considera generalmente como hipótesis de partida que la velocidad de operación es constante a lo largo de toda la curva circular. Además, la velocidad de operación utilizada en la calibración del modelo y la estimada por él suele ser la del punto medio de la curva, considerando que en él se presenta la velocidad mínima de la curva. Ambas hipótesis son falsas, aunque, según algunos estudios, la desviación de la realidad no es importante desde un punto de vista estadístico.

Estas hipótesis se han asumido recurridamente debido a que la toma de datos para obtener estas relaciones suele llevarse a cabo en sitios puntuales, siendo el punto central de la curva el más indicado en este caso, suponiéndose la velocidad constante en el resto. Ello, sin embargo, presenta el problema de que no se garantiza que la velocidad escogida sea la mínima, además de que no es cierto que se mantenga la velocidad constante dentro de la curva. Los errores cometidos no son excesivamente grandes, por lo que suelen admitirse estos procedimientos. Los modelos más avanzados están basados en procedimientos diferentes de toma de datos.

La Figura 3.1 muestra la localización de los puntos en los cuales se suele tomar datos puntuales de velocidad en curvas.

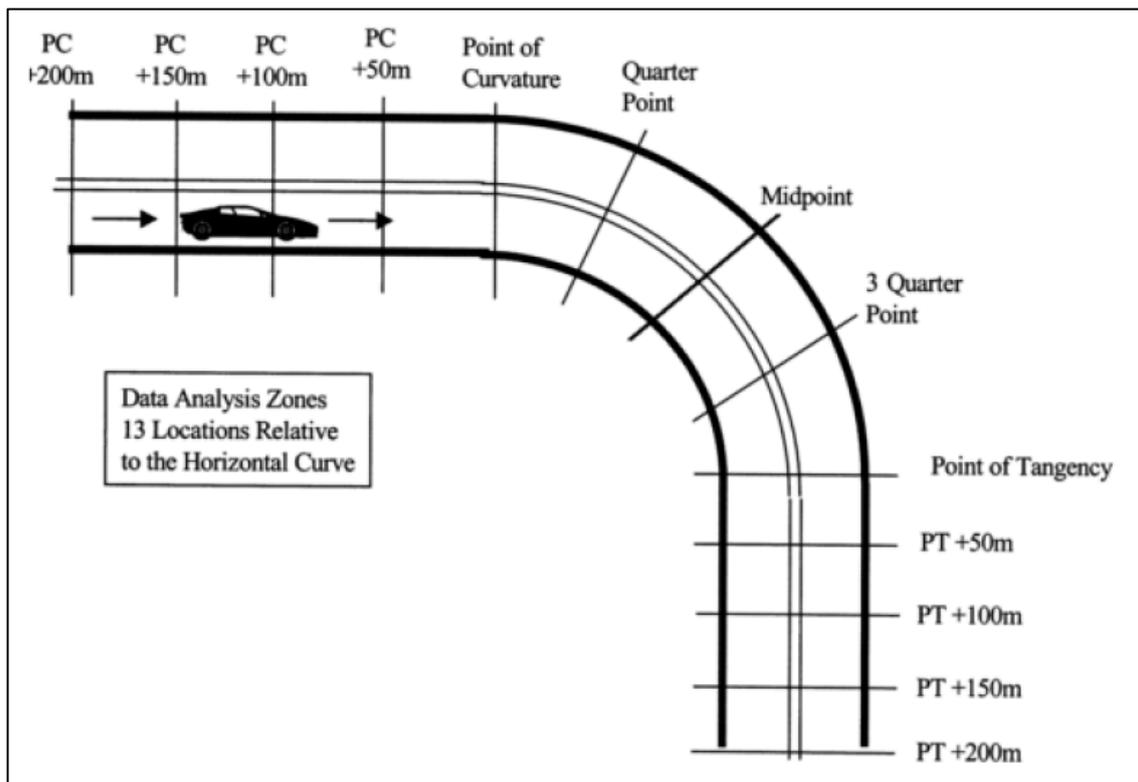


Figura 3.1 Localización de puntos en toma de datos puntuales en curvas

En cuanto a las variables de las que depende la velocidad de operación en las curvas, el radio y sus derivados (grado de curvatura) son las que mayor significancia estadística presentan. De hecho, en el estudio de las curvas la mayoría de los modelos suelen contar con la variable radio, ya que con expresiones muy sencillas se consigue un alto grado de correlación.

En algunos estudios, se han desarrollado modelos similares a los anteriores pero considerando la influencia de otros condicionantes como pueden ser las características del alzado, la anchura de los carriles o la tipología del elemento anterior a la curva.

De igual forma existen modelos más completos que incluyen también otras variables, como el ángulo de deflexión o la longitud de la curva; e incluso en ocasiones variables no geométricas, como la velocidad en la recta anterior.

Todos los modelos anteriormente presentados dan como resultado de la estimación un único valor para la velocidad en la curva. Sin embargo, hay otros modelos que no aceptan la hipótesis de que la velocidad se mantiene constante a lo largo de la curva. Este es el caso del estudio realizado por Islam y Seneviratne (1994). Así, debido a la imposibilidad de registrar un perfil empírico continuo, se calibraron tres modelos: uno al inicio, otro en el punto medio y otro al final de la curva, con coeficientes de determinación muy elevados: 99%, 98% y 90%.

Castro et al. (2011) también desarrollaron un modelo para la estimación de la velocidad de operación en cada uno de esos tres puntos, en este caso para carreteras de Colombia, con coeficientes de determinación de: 56%, 76% y 76%.

Otro modelo que proporciona estimación de la velocidad de operación en varios puntos de la curva es el de Gibreel et al. (2001). Sin embargo, este modelo se centra en la combinación de curvas con acuerdos verticales, calibrando cinco modelos de velocidad de operación para cinco puntos diferentes de la curva.

Los modelos anteriores dan como resultado estimaciones del percentil 85 de la velocidad de operación, mientras que Jessen et al. (2001) no se centran únicamente en el percentil 85, sino que también calibra los percentiles 50 y 95 de la velocidad de operación en el punto medio de la curva. De este modo se consigue, sin alcanzar la continuidad, tener un mejor conocimiento de la operación del tráfico.

Por otra parte, Nie y Hassan (2007) analizaron el comportamiento de los conductores en las curvas a partir de datos tomados mediante equipos de seguimiento continuo sobre los vehículos circulando en un circuito cerrado. Con ello se consiguió calibrar un gran número de modelos.

En España, Castro et al. (2010), dentro de un estudio para el análisis de la seguridad de las carreteras utilizando sistemas de información geográfica, desarrollaron un modelo para la estimación de la velocidad de operación en curvas a partir de una muestra de 18 elementos, teniendo el radio como variable explicativa y un R^2 de 0,75.

De igual forma Pérez-Zuriaga et al. (2010), a partir de datos continuos de velocidad, desarrollo diferentes modelos para estimar la velocidad de operación de los vehículos ligeros en España, a partir de del radio y el CCR como variables explicativas. En el caso del radio, encontraron un comportamiento diferente para radios menores a 400 m y radios mayores a este valor.

En el caso de datos continuos es importante determinar cuál es la velocidad a considerar, ya que, para cada curva, se dispone de infinitos datos de velocidades. Lo más conveniente sería seleccionar la velocidad mínima que se alcanza en las curvas, pero a menudo, por simplicidad a la hora de tratar los datos, se coge la velocidad del punto medio. Pérez-Zuriaga (2012), partiendo de los datos continuos de velocidades de diversos tramos de estudio, sí que hizo un análisis y determinó que no habían diferencias significativas entre la velocidad mínima y la del punto medio de la curva.

Por último, García-Jiménez (2017), llevo a cabo un estudio complementario al desarrollado por Pérez-Zuriaga (2012), utilizando los datos continuos de la anterior investigación, pero además incluyendo datos puntuales. Por otro lado, el análisis y desarrollo de los modelos, además de incluir las variables geométricas tuvo en cuenta la variables operacionales.

3.3.1.2 Modelización de las velocidades de operación en rectas

La estimación de la velocidad de operación en rectas es más compleja y menos precisa que en curvas debido, fundamentalmente, a que no hay una aceleración lateral que compensar, y por tanto, el riesgo de salirse de la vía no entra dentro de la elección de la velocidad por parte de los conductores.

Lo anterior hace que esta elección de la velocidad se base en otros criterios, como puede ser la sección transversal, el entorno de la vía, el tráfico existente, o la geometría general del tramo (longitud de la recta, o curvatura del tramo, por citar algunos ejemplos). Además, al no estar estos criterios tan relacionados con la posibilidad de sufrir un accidente, son interpretados por los conductores de formas muy diversas, lo que conlleva a que la dispersión de las velocidades en rectas es mucho mayor que en curvas, además de que su valor promedio también es superior.

Por todo ello, los modelos de velocidad para rectas presentan mucha menor correlación que los modelos de curvas. Esto no solo provoca modelos mucho más heterogéneos que para las curvas, sino que el número de los mismos es mucho menor, y la variabilidad finalmente explicada es mucho más reducida que en el otro caso.

3.3.1.2.1 Variables condicionantes

Al igual que en las curvas, las variables utilizadas para los diferentes modelos se pueden clasificar entre las variables geométricas, los índices de trazado y variables no geométricas.

Se debe destacar que el número de variables geométricas significativas es menor para las rectas que en el caso de las curvas.

- Variables geométricas
 - *Longitud*

Es posiblemente la variable geométrica más rápidamente apreciable a la hora de realizar un estudio, aunque también es una de las menos influyentes sobre la velocidad de operación. En algunos estudios se ha planteado una relación entre la velocidad de operación y la longitud de la recta (Polus et al., 2000), aunque no se ha generalizado su estudio. En estos casos, la relación es de tipo

logarítmico, con un fuerte crecimiento para las longitudes más pequeñas y una moderación paulatina de la velocidad a medida que la longitud aumenta.

También hay otros estudios que han tratado sobre dicha variable y que no han reflejado una independencia estadística, siendo en todos ellos la velocidad mayor a medida que la longitud aumenta. De todas formas, la variabilidad explicada por esta variable es mínima por lo que generalmente no es adoptada para los modelos (suele explicar generalmente menos del 5% de la variabilidad).

- *Anchura de carril y de arcén*

Un aumento de la anchura del carril o del arcén supone un aumento en la velocidad de operación. Esta influencia de la anchura de la sección transversal es similar en rectas y en curvas, sin embargo se incluye en rectas y no en curvas debido a que, como ya se ha comentado, en rectas el número de variables geométricas significativas es menor.

- *Curvas adyacentes*

De igual modo que en las curvas se ha estudiado la influencia de variables como la pendiente o la velocidad en la recta anterior, puede realizarse lo contrario: estudiar variables de las curvas adyacentes con el objetivo de encontrar una mayor relación de la velocidad en las rectas con parámetros no locales de la misma.

La influencia de las variables de las alineaciones adyacentes será mayor cuanto menor sea la longitud de la recta.

Uno de los estudios más importantes relacionados con la incorporación de las características de las curvas anterior y posterior en la determinación de la velocidad de operación de la recta es el desarrollado por Polus et al. (2000). En este estudio se desarrolló una nueva variable: *geometric measure*.

En este caso, para longitudes pequeñas, el *geometric measure* depende exclusivamente de los radios de las curvas anterior y posterior. Pasado cierto umbral, la relación cambia para considerar también la longitud de la recta.

- Índices de trazado

- *Tasa de cambio de curvatura*

Índice que estima la curvatura media de una vía o su sinuosidad. En este caso, el índice CCR se ha aplicado al tramo en que se encuentra la recta y en diferentes combinaciones con las curvas adyacentes.

- Variables no geométricas

Existen muchas otras variables que pueden ser incorporadas a los modelos, y que explican variabilidad adicional. Sin embargo, no está extendido mayoritariamente el uso de alguna variable en particular, por lo que cada modelo emplea las variables adicionales que considera oportunas.

Muchas de las variables adicionales son la visibilidad lateral, la densidad de accesos o la región geográfica. La mayoría de ellas tiene influencia sobre todo en el trazado, y no exclusivamente en las rectas. Es por ello que su tratamiento depende de cada modelo o estudio.

3.3.1.2.2 Modelos para la estimación de las velocidades de operación en rectas

Para la estimación de la velocidad de operación en rectas, existen ciertos modelos de velocidad de operación cuyo único resultado es un valor estático para cualquier recta. Por ello, la velocidad finalmente alcanzada es totalmente independiente de las condiciones de la recta, incluso de las condiciones del tramo que la comprende o de las condiciones de contorno de la misma.

La utilidad de estos modelos reside en establecer valores fijos de velocidad de operación para rectas, y servir como base para el desarrollo de modelos de perfiles de velocidad de operación.

Aunque aquí no se citan explícitamente, pero también se podrían configurar modelos de perfiles de velocidad a partir de la consideración directa de la velocidad deseada. En estos casos podría ser tomada la velocidad deseada como un modelo estático de estimación de la velocidad de operación en rectas.

Otros estudios han sido más ambiciosos y han intentado calibrar un modelo para la estimación de la velocidad de operación en rectas en función de distintas variables geométricas.

En este sentido, Fitzpatrick et al. (2000) realizaron un estudio gráfico y estadístico para el estudio de la dependencia de la velocidad de operación en rectas de distintas variables, distinguiendo entre índices de trazado y otras variables adicionales como la pendiente longitudinal, ancho de calzada, peligrosidad del entorno, densidad de accesos y velocidad límite.

Del estudio gráfico se obtuvieron ciertas conclusiones al observar la tendencia de la velocidad respecto a ciertas variables, indicando por ejemplo que la velocidad decrece al aumentar el CCR, el índice del grado de curvatura, el radio medio, el CCR vertical y el CCR combinado. Sin embargo, a pesar de las tendencias observadas, tras el estudio estadístico se comprobó que ninguna de las variables era estadísticamente significativa.

Por ello, la recomendación final del estudio fue emplear, como estimación, la velocidad media de las rectas de longitud mayor que 200 metros de la región geográfica a la que vaya a pertenecer la carretera. En un caso de total generalidad, se recomienda emplear la velocidad media (97,9 km/h).

Polus et al. (2000) tomaron datos de velocidades en rectas y en el punto medio de las curvas adyacentes y calcularon el percentil 50 y 85 de la velocidad de operación y la desviación típica. Debido al gran número de variables, se optó por realizar dos modelos: uno considerando únicamente las variables que más correlación presentan y otro considerando también las variables de menor correlación (variables secundarias). Tanto las variables primarias como las secundarias son estadísticamente significativas.

La variable considerada crítica es la longitud de la recta. Otras variables consideradas importantes son la velocidad límite, la curvatura antes y después de la recta, las características de deceleración y aceleración, pendiente y orografía, ancho de la vía, pendientes laterales, y la existencia de curvas de transición. Además, se definió una nueva variable, llamada *geometric measure*.

Se estudiaron varios modelos que relacionaban la velocidad de operación con las variables anteriores. Se calibraron dos modelos dependientes de la variable GM (*geometric measure*), en función del valor de la misma, pero la correlación fue bastante baja. Es por ello que se decidió proceder a otro tipo de calibración. Se dividieron las vías en cuatro grupos, según las condiciones del radio inicial, final y la longitud de la recta. Estos grupos y los modelos calibrados fueron los siguientes:

Grupo 1. Tanto el radio de la curva anterior como el de la siguiente presentan un radio inferior o igual a 250 metros. La longitud de la recta intermedia es menor de 150 metros.

Grupo 2. Los radios son pequeños (como en el caso anterior), pero la longitud de la recta intermedia está entre 150 y 1.000 metros. Como puede deducirse, las velocidades en las zonas cercanas a las curvas estarán controladas por los radios, pero dentro de la recta los conductores tenderán a acelerar independientemente de dichos radios.

Grupo 3. Los radios para cada una de las curvas son mayores de 250 metros, y la longitud de la recta intermedia entre 150 y 1.000 metros. La velocidad viene determinada por condiciones de la propia recta. Para ser incluida una geometría en este grupo, el mínimo valor de GM es 1.500 y el máximo 7.500. Para este grupo no se pudieron identificar modelos adecuados, debido a la gran variabilidad de los resultados.

Grupo 4. La longitud de la recta es superior a 1.000 metros y el radio es razonable (no viola los criterios de diseño).

En este modelo las principales variables estudiadas fueron geométricas, mientras que en el estudio de Jessen et al. (2001), en el que se analizaron 40 emplazamientos, se incluyeron en el análisis también variables relacionadas con otras velocidades.

Como resultado al mismo, no sólo se obtuvo una expresión para la velocidad de operación de percentil 85, sino que también se calibraron modelos para estimar la velocidad de operación en los percentiles 50 y 95.

Otro modelo que utilizó velocidades como variables independientes fue el de Crisman et al. (2005). En él se parte de la hipótesis de que las variables que más influencia tienen sobre la velocidad de operación de una recta son la longitud de la misma y la velocidad de operación de la curva precedente.

Este modelo sobreestima ligeramente las velocidades de operación de las rectas con longitud inferior a 200 metros, pero en general se adapta bien a cualquier recta. Este modelo depende de la velocidad deseada (calculada según el modelo de velocidad deseada de Crisman et al., 2005), aunque no directamente. Esta velocidad se encuentra implementada en el modelo que calcula la velocidad de operación en la curva precedente (según el modelo de Crisman et al., 2005, para curvas circulares). En el caso de que la velocidad resultante sea superior a la velocidad deseada (en posibles casos de rectas muy largas precedidas por curvas de radio amplio), se debe sustituir el valor por esta última.

De igual forma Pérez-Zuriaga et al. (2010), a partir de datos continuos de velocidad, propusieron un modelo en el que la velocidad de operación en el punto medio de la recta crecía a medida que lo hacía la longitud de la misma hasta un valor máximo que era la velocidad deseada. De igual forma, afirmaron que el comportamiento de la velocidad de operación era asintótico y tendía a la velocidad deseada.

Bella et al. (2014) propusieron dos modelos diferentes de la velocidad de operación en el punto de la recta donde se alcanzaba la velocidad máxima; uno para las condiciones de día y otro para las de noche. Los modelos tiene como variables explicativas la longitud de la recta y el radio de la curva anterior.

Gaca y Kiec (2016) propusieron un modelo para definir la velocidad de operación de las rectas de las carreteras polacas con velocidad máxima de 90 km/h y pendiente inferior al 3%, a partir del longitud y ancho de la calzada, distinguiendo entre rectas menores a 150m y rectas mayores a este valor.

Por último, García-Jiménez (2017), llevo a cabo un estudio complementario al desarrollado por Pérez-Zuriaga (2012), utilizando los datos continuos de la anterior investigación, pero además incluyendo datos puntuales. Por otro lado, el análisis y desarrollo de los modelos, además de incluir las variables geométricas tuvo en cuenta la variables operacionales.

3.3.2 Vehículos pesados

Como se ha visto hasta ahora, son muchas las investigaciones que se han centrado en desarrollar modelos de velocidad de operación para vehículos ligeros, mientras que especialmente pocas han tratado de modelar la velocidad de vehículos pesados.

No obstante, los camiones representan un porcentaje¹ importante del tráfico presente en muchas carreteras convencionales, lo que hace que se conviertan en un factor a tener en cuenta.

El desarrollo de un estudio en profundidad de la velocidad de operación de los vehículos pesados es esencial para conseguir diseños consistentes tanto para vehículos ligeros como para vehículos pesados. Por ello, algunas investigaciones han abordado el tema de la velocidad de operación de los vehículos pesados y sus diferencias con la de los vehículos ligeros, así como su influencia en la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de carreteras.

3.3.2.1 Variables condicionantes en curvas

Al igual que en los vehículos ligeros, en vehículos pesados la mayor parte de los estudios realizados encaminados a establecer una relación entre las velocidades de operación y elementos discretos del trazado se centran sobre las curvas.

Las variables utilizadas para los diferentes modelos se pueden clasificar entre las variables geométricas, los índices de trazado y variables no geométricas.

De todas las variables que controlan las curvas, las relacionadas con el radio (como el propio radio o el grado de curvatura) son las que más explican la velocidad de operación.

Para el estudio de las curvas los modelos suelen contar con la variable radio para explicar la variabilidad de la velocidad de operación (Donnell et al., 2001;

¹ En España según datos de la Dirección General del Tráfico, para 2015 había 5.108.151 de vehículos pesados comerciales matriculados, que representan el 18% del total de vehículos matriculados en el país.

Hassan, 2003; Misaghi y Hassan, 2005; Saizful, 2011; Jacob y Anjaneyulu, 2012). Sin embargo, los modelos más completos incluyen también otras variables, como el ángulo de deflexión o la longitud de la curva; e incluso, en ocasiones, variables no geométricas, como la velocidad en la recta anterior.

De esta manera las principales variables condicionantes son el: el radio, el grado de curvatura, el ángulo de deflexión, la longitud de la curva, la pendiente longitudinal, la tasa de cambio de curvatura, la velocidad de la recta precedente, la pendiente de la recta precedente y la velocidad límite.

3.3.2.2 Variables condicionantes en rectas

De igual forma, en los vehículos pesados, cobra especial relevancia la relación peso/potencia de los vehículos, puesto que condicionan significativamente la capacidad de maniobra de este tipo de vehículos (Saifizul et al., 2011). Así, mientras que en los vehículos ligeros la elección de la velocidad depende más del conductor, en los vehículos pesados la velocidad depende principalmente de las características mecánicas de estos (Jacob y Anjaneyulu, 2012; Morris y Donnell, 2014).

Las principales variables condicionante son: la longitud de la recta, la anchura de carril y de arcén, las curvas adyacentes, la pendiente longitudinal, el CCR y la longitud crítica.

- **Pendiente longitudinal**

La pendiente de la recta y las velocidades de operación de los vehículos pesados están negativamente correlacionadas (Donnell et al., 2001). Las pendientes descendentes hacen que la velocidad media de los camiones aumente debido a un aumento de la energía cinética que no puede absorberse por completo al frenar o arrastrar aerodinámicamente. Las pendientes ascendentes disminuyen la velocidad media del camión debido a las limitaciones en la relación peso-potencia del camión para contrarrestar la aceleración gravitacional (Harwood et al., 2003).

Existen relaciones calibradas para diferentes ratios peso/potencia, que determinan la velocidad de operación en una recta dependiendo de la pendiente y de la velocidad de entrada. Un ejemplo de ello es el estudio de Lan y Menéndez (2003).

En ese estudio evalúan diferentes modelos de velocidad para vehículos pesados con el objetivo, entre otros, de obtener la longitud crítica de la pendiente. Empleando un criterio teórico, obtienen diferentes curvas de velocidad en función de la distancia y de la pendiente para diferentes relaciones peso/potencia. Estos gráficos pueden emplearse en vez de los propuestos por la AASHTO (2011), debido a que en estos últimos la relación

peso/potencia es constante y no aplicable a la media de los vehículos pesados existentes actualmente.

- **Longitud crítica**

Se entiende como longitud crítica el espacio que un vehículo pesado puede recorrer bajo cierta pendiente antes de que su velocidad de operación resulte penalizada de forma importante debido a la existencia de dicha pendiente AASHTO (2011). Para su definición, se establece un vehículo con una relación peso/potencia de 120 kg/kW, y el descenso de velocidad que debe darse es de 15 km/h.

La AASHTO (2011) no proporciona métodos para el cálculo de la longitud crítica en otras condiciones.

Según el Green Book (2011), la longitud crítica depende fundamentalmente de tres factores:

- Peso y potencia del vehículo tipo. Esta relación suele ser de 120 kg/kW.
- Velocidad inicial del vehículo pesado.
- Velocidad a la cual se considera que la interferencia con el resto de vehículos es excesiva.

3.3.2.3 Modelización de la velocidad de operación en curvas

El estudio de las diferencias de velocidad de operación entre vehículos ligeros y pesados se ha extendido a las variables que influyen en su elección. La mayor parte de las investigaciones con este objetivo concluyeron que, mientras que el perfil de velocidad de los vehículos ligeros puede basarse principalmente en el trazado en planta de la carretera, el perfil de velocidad de los vehículos pesados depende en gran medida también del trazado en alzado.

Entre los diferentes modelos de velocidad de operación para vehículos pesados cabe destacar el desarrollado por Leisch y Leisch (1977), que tiene en cuenta tanto el trazado en planta como en alzado de la carretera. Además, estos investigadores identificaron las siguientes diferencias entre las velocidades de vehículos ligeros y pesados:

- La pendiente de la carretera, que no tiene un efecto significativo en los vehículos ligeros, ocasiona en los vehículos pesados altas tasas de deceleración y, por tanto, reducciones de la velocidad muy bruscas.
- Las velocidades de operación de los vehículos pesados están principalmente influenciadas por las características mecánicas de los propios vehículos, mientras que la de los vehículos ligeros dependen mayoritariamente de las características del propio conductor.

- La velocidad de los vehículos pesados es alrededor de 8 km/h menor que la de los vehículos ligeros en curvas.

Asimismo, concluyeron que para que un diseño fuese consistente, la diferencia entre la velocidad de operación de vehículos ligeros y pesados en un determinado elemento del trazado debía ser inferior a 15 km/h.

Al-Maseid et al. (1995) desarrollaron modelos de reducción de la velocidad en transiciones recta-curva y en curvas sucesivas para tres tipos de vehículos: vehículos ligeros, camiones ligeros y camiones pesados. Las conclusiones más interesantes del estudio fueron que la pendiente es un factor que cobra mayor importancia a medida que se incrementa, sobre todo en vehículos pesados, y que la velocidad de los vehículos ligeros está fuertemente influenciada por el trazado en planta de la carretera.

Donnell et al. (2001) desarrolló un modelo de velocidad de operación de camiones en curvas a partir de la observación en campo de la velocidad en 11 curvas y la simulación de la velocidad en 30 curvas mediante el programa TWOPAS. En cada curva se identificó la velocidad de 20 camiones en 13 puntos a partir de pistolas lidar. Así, se calibraron un total de 13 modelos donde las variables más significativas fueron el radio de la curva, la longitud de la recta anterior, la pendiente de la recta anterior y la interacción entre el radio de la curva y la longitud de la recta.

Tras el estudio concluyeron que el aumento del radio de la curva y la longitud de la recta anterior estaba asociado con una V_{85} mayor en el punto de tangencia entre ambos elementos (PT), mientras que un aumento de la pendiente de la recta de entrada lo estaba con una disminución de la V_{85} a lo largo de la recta hasta el punto PT. Por otra parte, un aumento de la pendiente de la recta de salida combinada con un aumento de la longitud de la misma recta se asoció con una disminución de la V_{85} .

En la Tabla 3.1 Modelos para la estimación de la velocidad de operación de vehículos pesados de Donnell et al. (2001) se aprecian los diferentes modelos para la estimación de la velocidad de operación de vehículos pesados en función de características geométricas.

Las series de regresión fueron desarrolladas para estimar el percentil 85 de velocidad a lo largo de curvas con variaciones en las características de diseño. Estos modelos principalmente consideran el efecto de las curvas sobre los camiones.

No obstante, los autores advierten de la limitación de estos modelos, pues no han considerado los efectos de la combinación del trazado y el alzado, al igual

que el ratio peso-potencia, que muy probablemente tiene especial importancia cuando la pendiente es acusada.

Gibreel et al. (2001) calibraron un modelo para la estimación de la velocidad de operación desarrollada en carreteras convencionales, sin distinguir entre vehículos ligeros y pesados. Utilizaron dos tipos de combinaciones de trazado: curva en planta con acuerdo cóncavo (9 tramos) y curva en planta con acuerdo convexo (10 tramos). Los resultados mostraron que las variables geométricas con mayor influencia en la velocidad de operación son: el radio de la curva, el ángulo de deflexión de la curva, la distancia horizontal entre el punto de intersección de las rectas y el vértice del acuerdo, longitud del acuerdo, pendientes, diferencia algebraica entre pendientes y el peralte.

Tabla 3.1 Modelos para la estimación de la velocidad de operación de vehículos pesados de Donnell et al. (2001)

Location	Model	R ²
PC200	$V_{85} = 51.5 + 0.137 R - 0.779 \text{ GAPT} + 0.0127 \text{ LAPT} - 0.000119(\text{LAPT} * R)$	0.622
PC150	$V_{85} = 54.9 + 0.123 R - 1.07 \text{ GAPT} + 0.0078 \text{ LAPT} - 0.000103(\text{LAPT} * R)$	0.627
PC100	$V_{85} = 56.1 + 0.117 R - 1.15 \text{ GAPT} + 0.0060 \text{ LAPT} - 0.000097(\text{LAPT} * R)$	0.613
PC50	$V_{85} = 78.7 + 0.0347 R - 1.30 \text{ GAPT} + 0.0226 \text{ LAPT}$	0.552
PC	$V_{85} = 78.4 + 0.0140 R - 1.40 \text{ GDEP} - 0.00724 \text{ LDEP}$	0.562
QP	$V_{85} = 75.8 + 0.0176 R - 1.41 \text{ GDEP} - 0.0086 \text{ LDEP}$	0.600
MP	$V_{85} = 75.1 + 0.0176 R - 1.48 \text{ GDEP} - 0.00836 \text{ LDEP}$	0.600
3QP	$V_{85} = 74.7 + 0.0176 R - 1.59 \text{ GDEP} - 0.00814 \text{ LDEP}$	0.611
PT	$V_{85} = 74.5 + 0.0176 R - 1.69 \text{ GDEP} - 0.00810 \text{ LDEP}$	0.611
PT50	$V_{85} = 82.8 - 2.00 \text{ GDEP} - 0.00925 \text{ LDEP}$	0.564
PT100	$V_{85} = 83.1 - 2.08 \text{ GDEP} - 0.00934 \text{ LDEP}$	0.577
PT150	$V_{85} = 83.6 - 2.29 \text{ GDEP} - 0.00919 \text{ LDEP}$	0.604
PT200	$V_{85} = 84.1 - 2.34 \text{ GDEP} - 0.00944 \text{ LDEP}$	0.607

NOTE: V85 = average speed for 85th percentile drivers (km/h); R = curve radius (m); GAPT = grade of approach tangent; LAPT = length of approach tangent (m); GDEP = grade of departure tangent; LDEP = length of departure tangent (m).

Hassan (2003), estudio el comportamiento de vehículos ligeros, camiones ligeros y camiones pesados, en cuatro condiciones diferentes (día, noche y dos periodos de transición), en tres curvas en tres carreteras diferentes. En este concluyó que no había diferencias significativas entre la velocidad de los vehículos ligeros y los camiones ligeros, pero sí entre estos y los vehículos pesados. Así, los vehículos ligeros y los camiones ligeros adoptan un mayor velocidad de operación que los vehículos pesados. De igual forma la velocidad de operación puede diferenciarse en las dos direcciones en la misma curva, inclusive cuando el efecto de los acuerdos verticales es mínimo.

Misaghi y Hassan (2005), tras el estudio de 40 curvas con diferentes características geométricas seleccionadas entre las existentes en 4 tramos diferentes de carreteras convencionales, consideraron que no había diferencias significativas entre la velocidad de los vehículos ligeros y los camiones ligeros, pero sí entre estos y los vehículos pesados.

Asimismo, Saifizul et al. (2011) concluyeron que el tipo de vehículo tiene un efecto significativo en la velocidad pero sólo en el caso en que el tamaño de los vehículos es significativamente diferente. En el caso en que los vehículos son similares en tamaño pero difieren en número de ejes, el peso es el factor dominante. Por otra parte, observaron que la velocidad se reduce de forma monótona al aumentar el peso bruto del vehículo para menores de 20 t, mientras que la velocidad se mantiene constante para mayores de este valor. Los datos fueron tomados a partir del sistema de pesaje en movimiento o pesaje dinámico (*weighing in motion -WIM*).

De esta manera, Hassan (2003), Misaghi y Hassan (2005) y Saizful (2011), obtuvieron resultados similares que concluyeron que no había diferencias entre las velocidades de vehículos de dos ejes (turismos y camiones ligeros), pero sí entre las de estos y los vehículos pesados (3 o más ejes).

Jacob y Anjaneyulu (2012) estudiaron la velocidad de operación en curvas en función del tipo de vehículo: vehículos ligeros, motos, autobuses y camiones. No se consideraron los vehículos multieje porque su muestra no era estadísticamente representativa. Su estudio lo basaron en 152 curvas en carreteras con pendientes entre -2% y +2%, por lo que no pudieron medir adecuadamente el efecto de la pendiente longitudinal en la velocidad de operación.

De esta manera, se centraron en las variables geométricas del trazado en planta, observaron que la velocidad de los vehículos pesados en recta aumentaba al aumentar la longitud de esta y que en curva la velocidad dependía tanto del radio como de la longitud de esta, aumentando con el radio y la longitud.

En las Tabla 3.2 y Tabla 3.3 se muestran los modelos de Jacob y Anjaneyulu (2012), en donde se distinguen entre los diferentes vehículos analizados y la estimación de la velocidad de operación en el punto de tangencia y en el punto medio de la curva.

Tabla 3.2 Modelos para la estimación de la velocidad de operación en el punto de tangencia de Jacob y Anjaneyulu (2012)

Vehicle type	Model	R^2	DF	RMSE	
				CD	VD
Car	$V_T = 47.50 + 3.6 \times PTL S^{0.312}$	0.89	102	9.63	12.18
Two-wheeler	$V_T = 44.10 + 3.6 \times PTL S^{0.300}$	0.87	93	10.39	8.77
Bus	$V_T = 45 + 3.6 \times PTL S^{0.281}$	0.90	64	7.10	6.38
Truck	$V_T = 37.50 + 3.6 \times PTL S^{0.335}$	0.95	100	7.42	7.78
All vehicle	$V_T = 45 + 3.6 \times PTL S^{0.312}$	0.91	64	9.04	8.34

Note: DF = degrees of freedom; CD = calibration data set; VD = validation data set.

Donde:

V_7 = Velocidad de operación en el punto de tangencia (km/h)

$PTLS$ = Longitud de la recta precedente hasta el punto de observación (m)

Tabla 3.3 Modelos para la estimación de la velocidad de operación en el punto medio de la curva de Jacob y Anjaneyulu (2012)

Vehicle type	Model	R^2	R^2_{adj}	DF	RMSE	
					CD	VD
Car	$V_{85} = 69.00 - (1005.39/R) - 0.065 \times CL$	0.80	0.78	102	7.22	6.66
Two-wheeler	$V_{85} = 67.00 - (1105.72/R) - 0.069 \times CL$	0.82	0.81	93	7.55	8.30
Bus	$V_{85} = 70.20 - (1169.68/R) - 0.099 \times CL$	0.83	0.81	64	9.26	9.50
Truck	$V_{85} = 63.20 - (1063.82/R) - 0.061 \times CL$	0.84	0.83	100	6.79	6.93
All vehicle	$V_{85} = 65 - (1009.90/R) - 0.053 \times CL$	0.86	0.84	64	5.58	6.36

Note: DF = degrees of freedom; CD = calibration data set; VD = validation data set.

Donde:

V_{85} = Velocidad del percentil 85 (km/h)

CL = Longitud de la curva (m)

3.3.2.4 Modelización de las velocidades de operación en rectas

La estimación de la velocidad de operación en rectas es bastante más compleja y menos precisa que en curvas. Esto se debe principalmente a que en este tipo de elemento geométrico no existe aceleración transversal y, por tanto, el riesgo percibido por los conductores con respecto a una salida de vía es prácticamente inexistente. Por tanto, la elección de la velocidad se basa en otros criterios tales como la sección transversal, el entorno de la carretera, el tráfico existente, el comportamiento geométrico global del tramo y la relación peso/potencia del vehículo (Saifizul et al., 2011).

En cuanto a este último aspecto, cabe resaltar que la elección de la velocidad en rectas de vehículos ligeros depende principalmente del propio conductor, mientras que en los vehículos pesados dependerá en gran medida de las características mecánicas de los mismos y la pendiente longitudinal de la carretera (Jacob y Anjaneyulu, 2012; Morris y Donnell, 2014).

Todo ello conduce a que exista un número muy reducido de modelos de velocidad en rectas para vehículos pesados.

Por otra parte, existen varios estudios que no se basan en datos experimentales, sino que se centran en el estudio del perfil de velocidad de operación de vehículos pesados en tramos de pendiente ascendente a partir de un modelo dinámico-mecánico (Bester, 2000; Lan y Menéndez, 2003; Rakha y Yu, 2004; Echaveguren y Carrasco, 2015). Estos modelos tratan de modelizar la velocidad de estos vehículos a partir de la potencia del vehículo y la resistencia del aire, la pendiente, el rozamiento e incluso las condiciones del

pavimento, asumiendo que los camiones disminuyen su velocidad hasta un cierto valor que mantienen constante hasta el final del tramo ascendente. Sin embargo, Arellano et al. (2015) identificaron que cuando la longitud del tramo ascendente era inferior a 1 km, los camiones eran capaces de acelerar en el último tercio del ascenso.

La AASHTO (2011) proporciona ábacos para estimar las tasas de aceleración y deceleración de vehículos pesados en rectas, para un único camión tipo de 120 kg/kW, a partir de la velocidad de entrada a la recta de 110 km/h, la distancia recorrida y el valor de la pendiente longitudinal (Figura 3.2 y Figura 3.3).

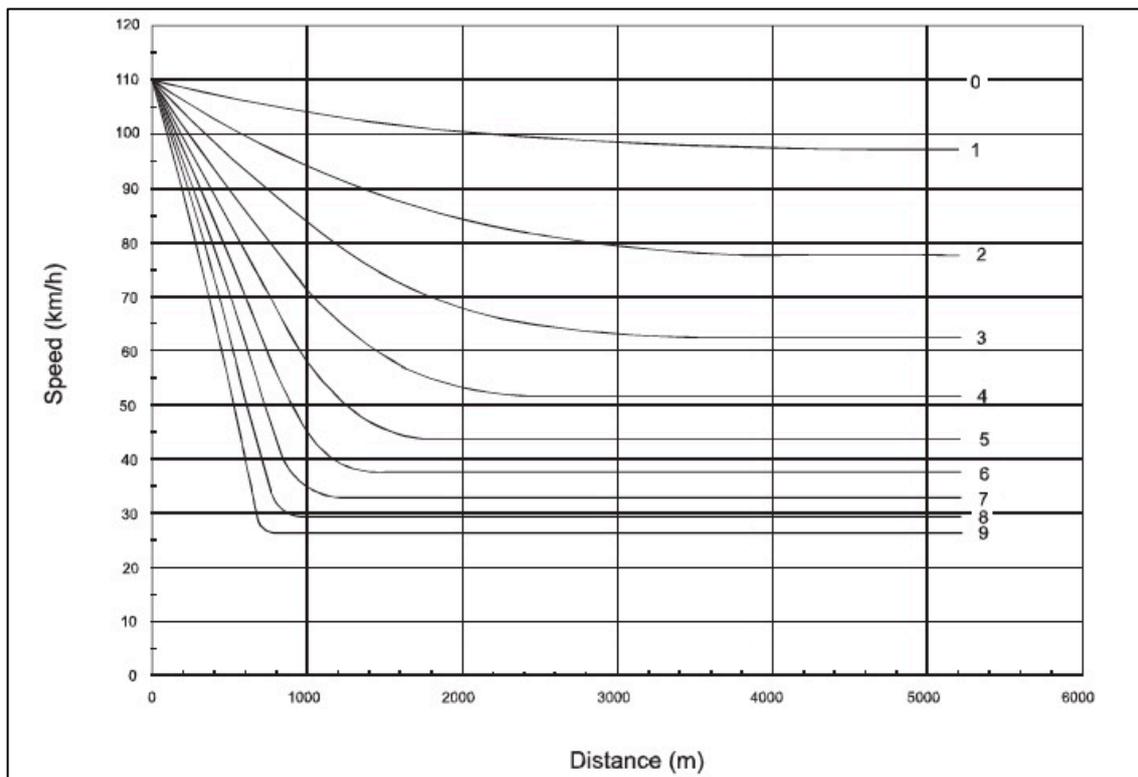


Figura 3.2 Ábaco de deceleración para un vehículo pesado tipo 120 kg/kW desde 110 km/h

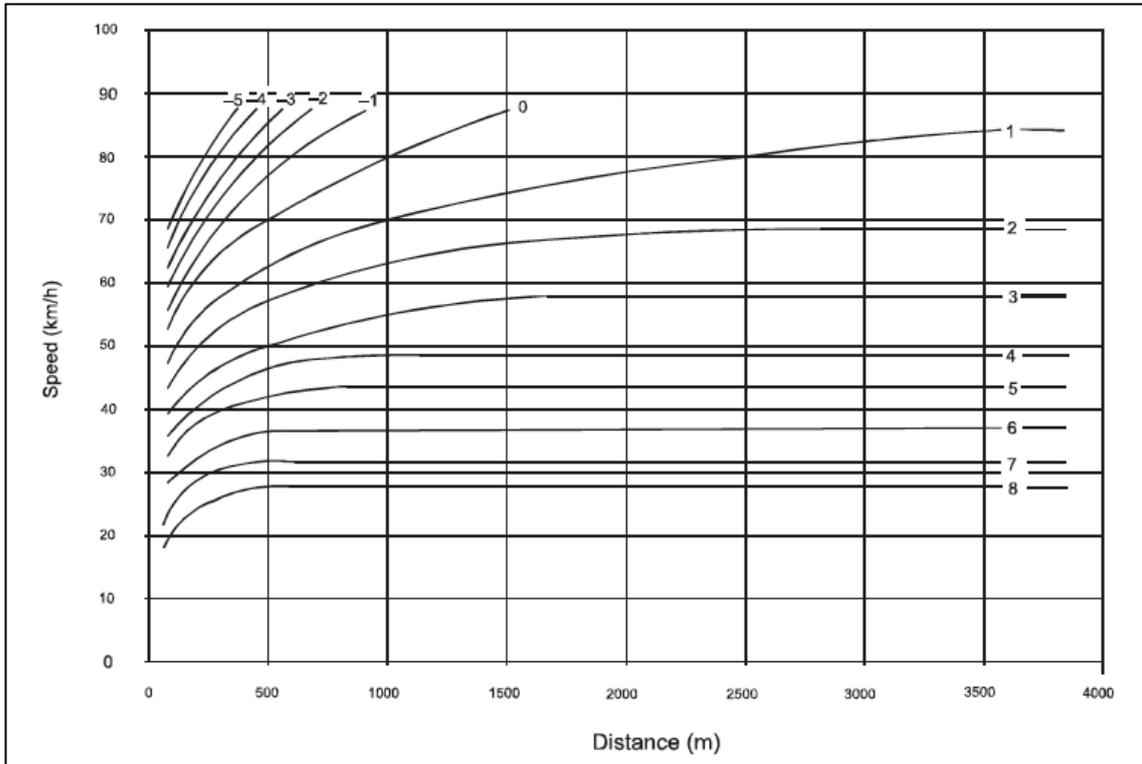


Figura 3.3 Ábaco de aceleración para un vehículo pesado tipo 120 kg/kW desde 110 km/h

De igual forma, la Instrucción de Carreteras Española, la Norma 3.1-I.C (2016) también proporciona ábacos para estimar las tasas de aceleración y deceleración de vehículos pesados en rectas, para un único camión tipo de 120 kg/kW, pero en este caso, a diferencia de la AASHTO (2011), la velocidad de entrada a la recta es de 100 y 80 km/h (Figura 3.4 y Figura 3.6).

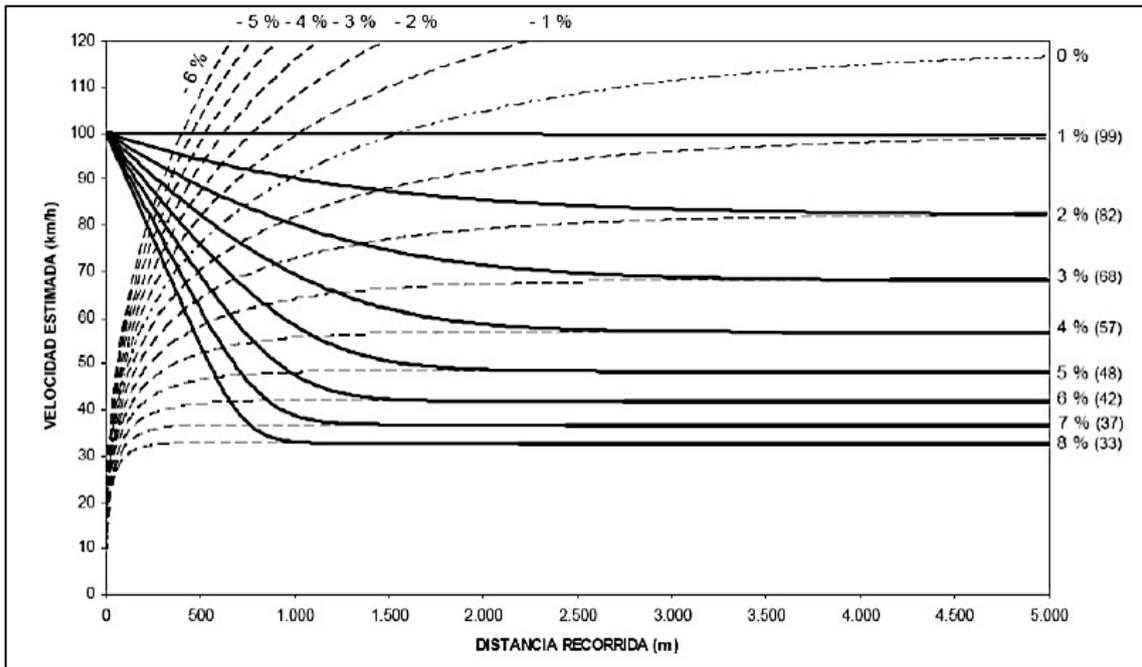


Figura 3.4 Ábaco de aceleração y deceleración para un vehículo pesado tipo 120 kg/kW desde 100 km/h

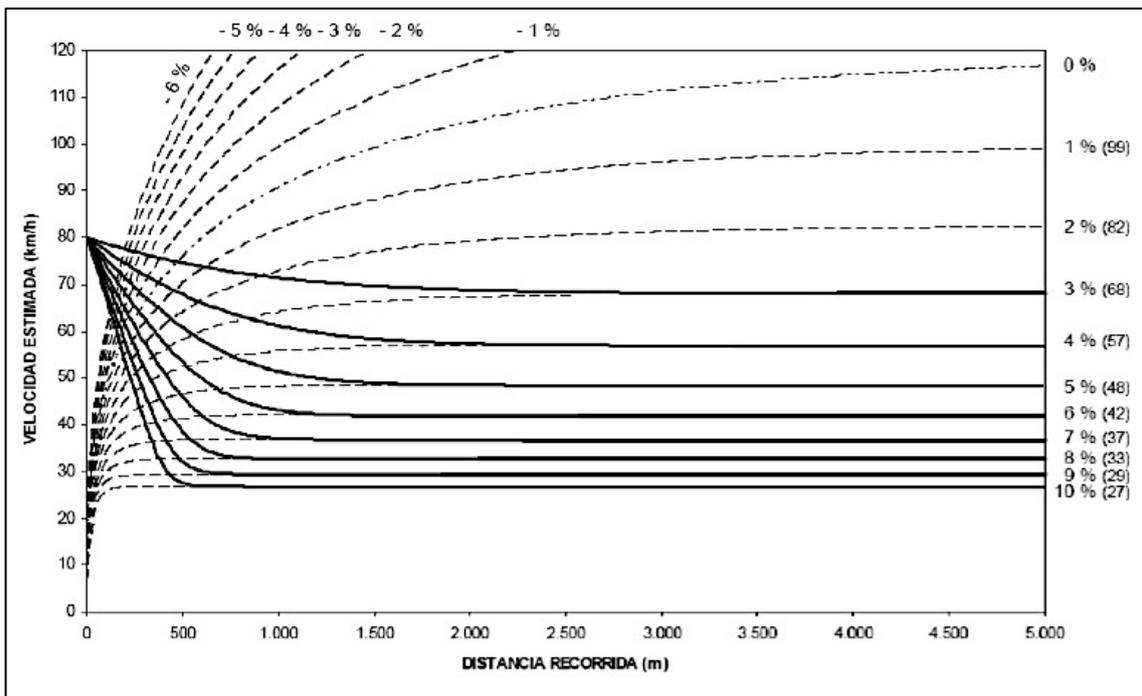


Figura 3.5 Ábaco de aceleração y deceleración para un vehículo pesado tipo 120 kg/kW desde 80 km/h

Debido a que los ábacos de la AASHTO (2011), son para una relación peso/potencia constante y no aplicable a la media de los vehículos pesados existentes actualmente, hay relaciones calibradas para diferentes ratios peso/potencia, que determinan la velocidad de operación en una recta

dependiendo de la pendiente y de la velocidad de entrada. Un ejemplo de ello es el estudio de Lan y Menéndez (2003) y Rakha y Yu (2004).

El modelo desarrollado por Rakha y Yu (2004), permite estimar la velocidad de operación de vehículos pesados en rectas, a partir de la relación peso/potencia del vehículo, la pendiente longitudinal, la longitud de la recta y la calidad del pavimento (Figura 3.6-Figura 3.8).

Cabe destacar que el modelo propuesto por Rakha y Yu (2004) es capaz de representar el modelo propuesto por la AASHTO (2011), a través de una relación peso/potencia de 120 kg/kW y un pavimento con una superficie calificada como aceptable, es decir, con un valor del índice *Pavement Serviceability Index* entre 1,5 y 3,0.

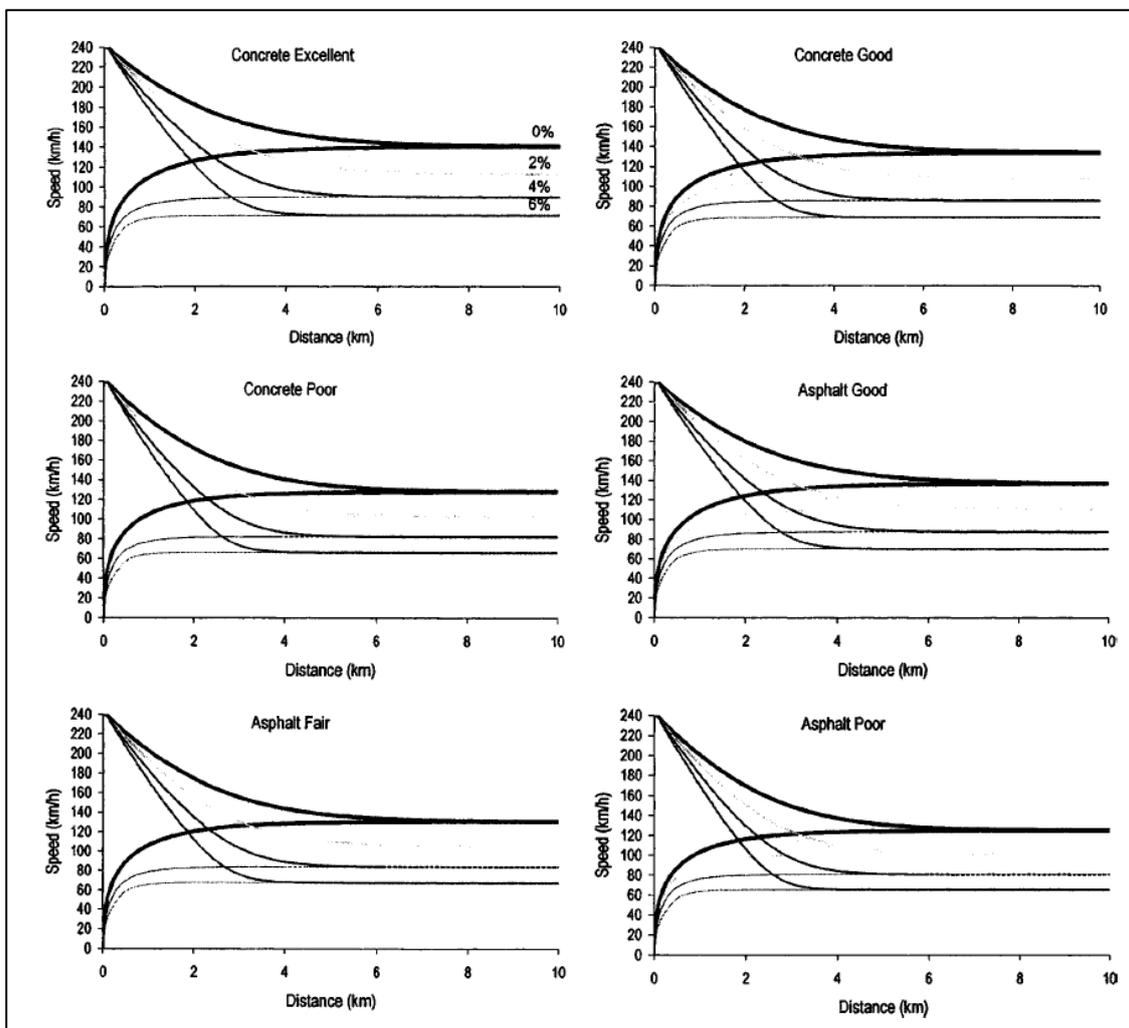


Figura 3.6 Curvas de velocidad de operación de vehículos pesados con relación peso/potencia igual a 60 kg/kW

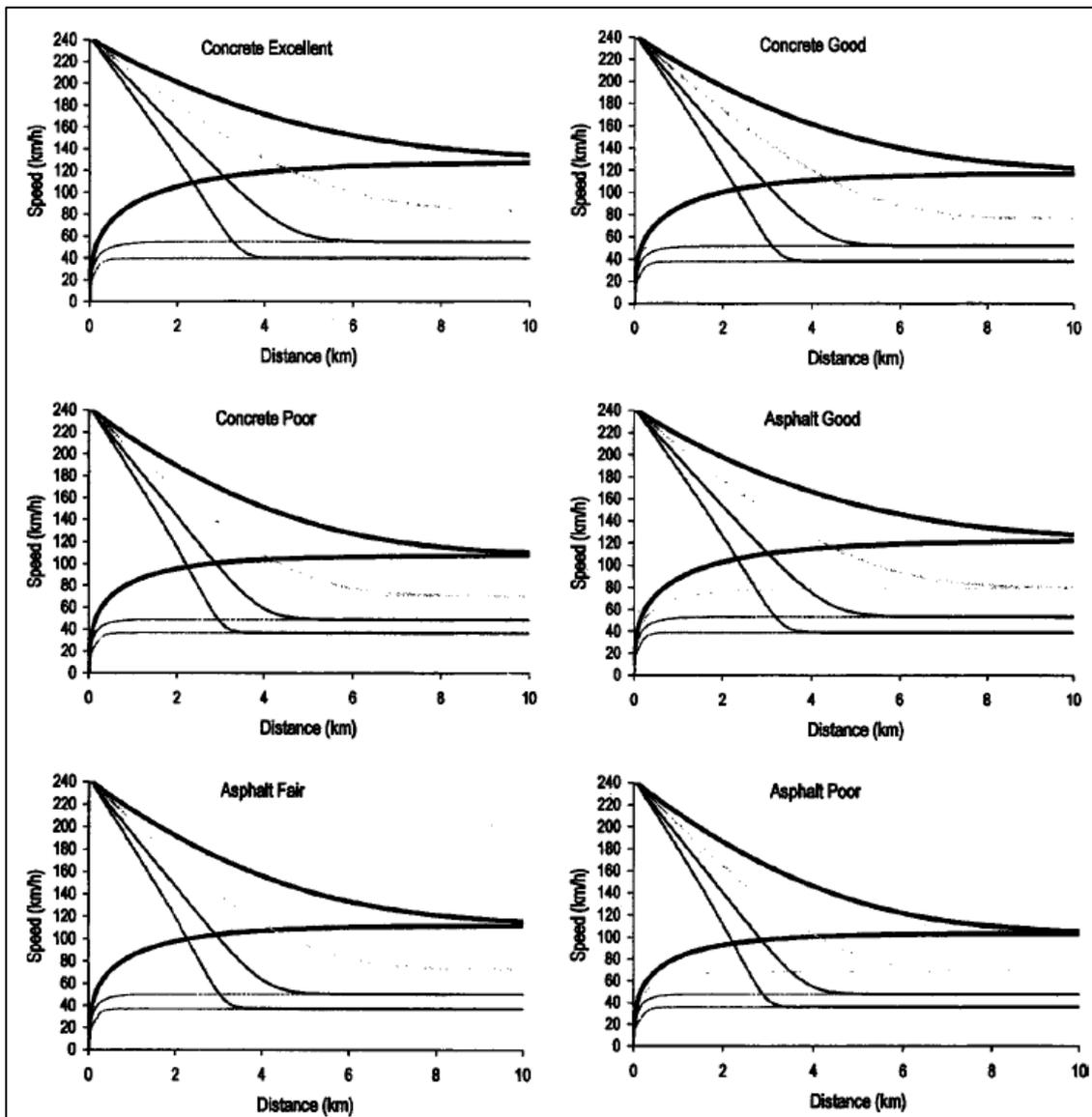


Figura 3.7 Curvas de velocidad de operación de vehículos pesados con relación peso/potencia igual a 120 kg/kW

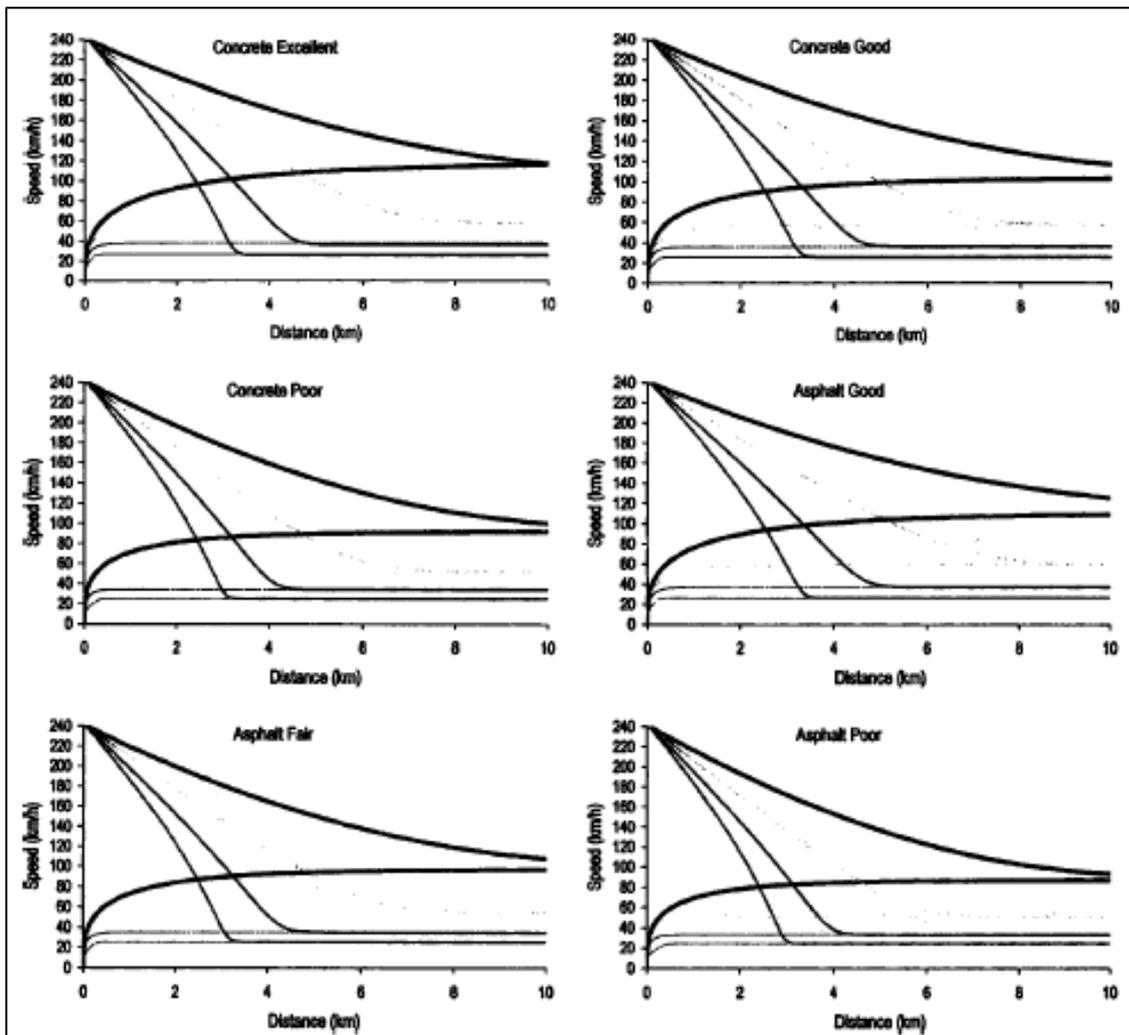


Figura 3.8 Curvas de velocidad de operación de vehículos pesados con relación peso/potencia igual a 180 kg/kW.

Otros estudios no se han basado en la velocidad de operación de los vehículos pesados, sino en su velocidad media (V_m). Así, Adolini-Minnicino y Elefteriadou (2004), tras un estudio basado en datos de simulación con TWOPAS, concluyeron que un aumento de la longitud de la recta anterior y de su pendiente se asociaban a una disminución de esta velocidad en varios puntos entre el punto de curvatura (PC) y el punto de tangencia (PT) y que un aumento de la longitud del acuerdo vertical se asociaba a una disminución de la velocidad media.

Morris y Donnell (2014) desarrollaron un modelo de velocidad de operación para camiones. Aunque en este caso se trata de un modelo para carreteras con más de dos carriles por sentido, cabe destacar algunas de las conclusiones que se extrajeron del estudio:

- La pendiente de la carretera cobra mayor importancia en la velocidad de los camiones que en la de los vehículos ligeros.

- La velocidad media de los vehículos ligeros es estadísticamente significativa y está asociado positivamente con la velocidad media de los camiones.
- En cuanto al trazado en planta, la variable que mayor influencia tiene sobre la velocidad de los camiones es la inversa del radio de la curva.
- En curvas a derechas la velocidad observada fue menor que en curvas a izquierdas. Aunque este resultado fue contrario al observado en vehículos ligeros, Morris y Donnell indicaron que probablemente se deba a que los camiones no cortan la curva como sí hacen los vehículos ligeros.

Concluyendo, la mayoría de modelos se centran en el trazado en planta de la carretera para estimar las velocidades de operación, todavía más concretamente en las características geométricas de la curva. No obstante, las investigaciones anteriores demuestran que la pendiente de la carretera y la velocidad desarrollada en la recta anterior se comportan como variables muy influyentes en la velocidad de operación en curvas, sobre todo en el caso de los vehículos pesados. En este sentido, también cobra especial relevancia el peso y la potencia de los vehículos pesados, puesto que condicionan significativamente la capacidad de maniobra de este tipo de vehículos (Saifizul et al., 2011).

3.4 CONSIDERACIONES FINALES

En esta sección del estado del arte se concluye con las consideraciones finales, que resumen las limitaciones del conocimiento actual y suponen una ventana de oportunidad para las cuestiones a investigar.

3.4.1.1 Escasez de modelos con la consideración de los vehículos pesados

La mayoría de los modelos de velocidad desarrollados hasta la fecha se han centrado en el estudio de la velocidad desarrollada por vehículos ligeros. La existencia de modelos para estimar la velocidad de vehículos pesados es escasa (Hassan et al., 2011).

La estimación de la velocidad de operación en rectas es más compleja y menos precisa que en curvas debido, fundamentalmente, a que no hay una aceleración lateral que compensar, y por tanto, el riesgo de salirse de la vía no entra dentro de la elección de la velocidad por parte de los conductores.

Por todo ello, los modelos de velocidad para rectas presentan mucha menor correlación que los modelos de curvas. Esto no solo provoca modelos mucho más heterogéneos que para las curvas, sino que el número de los mismos es

mucho menor, y la variabilidad finalmente explicada es mucho más reducida que en el otro caso.

Asimismo, la mayoría de los modelos se basan en el trazado en planta. Sin embargo, Leisch y Leisch (1977), Al-Maseid et al. (1995) y Morris y Donnell (2014) concluyeron que la pendiente ascendente de la carretera, que no tiene un efecto significativo en los vehículos ligeros, ocasiona en los vehículos pesados altas tasas de deceleración y, por tanto, reducciones de la velocidad muy bruscas.

Por otra parte, Saifizul et al. (2011) concluyeron que el tipo de vehículo tiene un efecto significativo en la velocidad pero sólo en el caso en que el tamaño de los vehículos es significativamente diferente. En el caso en que los vehículos son similares en tamaño pero difieren en número de ejes, el peso es el factor dominante. En este sentido, también debe considerarse la posible variación de la velocidad de los vehículos pesados debida a la influencia de la carga variable que pueden transportar.

De igual forma, la mayor parte de los modelos se basan en la predicción de las velocidades en carreteras convencionales con un perfil longitudinal relativamente llano con pendientes entre -4% y +4%.

3.4.2 Tamaño de muestra

El número de observaciones por tramo o elemento geométrico es un aspecto importante al examinar la validez de un modelo de velocidad de operación. La mayor parte de los modelos calibrados hasta el momento se han basado en una muestra relativamente reducida. Esto conduce a que la fiabilidad de la predicción de estos modelos sea reducida, es decir, puede que las observaciones consideradas no representen adecuadamente la distribución de velocidades de la población.

La Tabla 3.4 y Tabla 3.5 muestran el número de curvas y rectas utilizadas para la modelización de las velocidades de operación de vehículos pesados en investigaciones anteriores.

Tabla 3.4 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en curvas

Literatura de referencia	Muestra
Al-Maseid et al. (1995)	57
Donnell et al. (2001)	11
Gibreel et al. (2001)	19
Misaghi y Hassan (2005)	40
Jacob y Anjaneyulu (2012)	152

Tabla 3.5 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en rectas

Literatura de referencia	Muestra
Al-Maseid et al. (1995)	57
Donnell et al. (2001)	11
Arellano et al. (2015)	24
Boroujerdian et al. (2016)	42

De igual forma, el número de elementos geométricos (curvas y rectas) utilizado en la calibración de los modelos también es reducido. Hay que tener en cuenta que la ausencia de datos para un cierto rango de la variable independiente podría conducir a una falsa mejora de los parámetros de bondad de ajuste.

3.4.3 Metodología de toma de datos

El principal obstáculo en el desarrollo de modelos para vehículos pesados es la insuficiente cantidad de velocidades observadas en campo, ya que la mayoría de los estudios (Al-Maseid et al., 1995; Donnell et al., 2001; Gibreel et al., 2001) se basan en toma de datos puntuales.

Hassan (2004) sugirió, establecer y acordar un procedimiento de recopilación de datos óptimo para capturar el comportamiento real de los conductores, sin que tal procedimiento influya en la velocidad real desarrollada.

La mayoría de estudios desarrollados anteriormente han sido llevados a cabo a través de observaciones puntuales de la velocidad. Esta toma de datos de velocidad mediante pistola radar son mediciones manuales pueden introducir tres tipos de errores:

- Error del coseno: es inducido por la desviación entre el rayo radar leído y la dirección conducida real.
- Error humano en la medida de las velocidades.
- Variación del comportamiento de los conductores al percibir el equipo de medida como un equipo de control de la velocidad.

Con el fin de evitar estos errores asociados a las pistolas radar se han utilizado otras metodologías como pistolas Lidar o sensores piezoeléctricos embebidos en el pavimento (Misaghi y Hassan, 2005; Jacob y Anjaneyulu, 2012). Sin embargo, aunque los errores se minimizan con estos dispositivos, se sigue obteniendo como único resultado datos puntuales de velocidades en determinadas ubicaciones. En este sentido, todas las investigaciones previas asumen que la velocidad mínima en curvas se produce en el punto medio de la misma, mientras que la velocidad máxima en rectas se consigue en el punto

medio de las mismas o a una distancia fija anterior a la recta. Sin embargo, estas hipótesis no han podido ser contrastadas al no disponer de datos continuos de velocidad.

Las metodologías que sí permiten perfiles continuos de velocidad en un amplio tramo de carretera de forma que se pueden estudiar tramos curvos, rectos y zonas de transición recta-curva-recta son las que están basadas en simuladores de conducción, vehículos instrumentados o vehículos equipados con dispositivos GPS. En ambas metodologías se utilizan, como conductores, voluntarios conocedores de los fines de la investigación.

La utilización de un vehículo instrumentado lleva a que los conductores actúen de una manera menos natural debido a la falta de familiarización con los mandos y las respuestas del vehículo, fenómeno que todavía se acentúa más en el caso de los simuladores de conducción debido al entorno virtual del mismo.

Para hacer frente a estas deficiencias, Pérez-Zuriaga et al. (2010) y Cafiso y Cernis (2012) propusieron la medición continua de la velocidad a partir de dispositivos GPS. La metodología desarrollada por Pérez-Zuriaga et al. (2010) permite la obtención de la velocidad de operación de cada punto del trazado, lo que permite explorar de una manera más precisa el comportamiento de los conductores, además, se comprobó que este pequeño dispositivo no influye prácticamente en el comportamiento de los conductores, por lo cual, la toma de datos se puede considerar naturalística.

4 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

El principal objetivo del presente trabajo de investigación es analizar y modelizar la velocidad del percentil 85, la velocidad media y el percentil 15, en flujo libre desarrollada por vehículos pesados en curvas y rectas de carreteras convencionales a partir de variables geométricas relacionadas con el trazado y las variables operacionales.

Para la consecución del objetivo principal se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Revisión bibliográfica sobre la influencia de vehículos pesados en la funcionalidad y seguridad vial de carreteras convencionales y la inclusión de este tipo de vehículo en normativas y recomendaciones de diseño geométrico de carreteras.
- Restitución geométrica de los tramos de carreteras identificados a partir de las trayectorias individuales de la muestra de vehículos pesados.
- Selección de las variables geométricas de los elementos de los tramos de carreteras.
- Obtención de los perfiles de velocidad continuos en condiciones de flujo libre de cada vehículo a partir de los datos registrados y de los distintos percentiles para cada tramo de carretera.
- Selección de curvas y rectas.
- Estudio de la relación entre las variables geométricas de los elementos de la carretera seleccionados, las variables operacionales y las velocidades desarrolladas, tanto para curvas como para rectas.
- Desarrollo de modelos de estimación de la velocidad del percentil 85, la velocidad media y la velocidad del percentil 15 en curvas en función de las características geométricas del trazado y las variables operacionales.
- Desarrollo de modelos de estimación de la velocidad del percentil 85, la velocidad media y la velocidad del percentil 15 en rectas en función de las características geométricas del trazado y las variables operacionales.

A continuación, se plantean las hipótesis de la investigación. Estas se han dividido en dos grupos: hipótesis de partida, que sirven de base sobre la que se fundamentará la investigación pero que se consideran suficientemente validadas por otras investigaciones previas, y las hipótesis que serán contrastadas con el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster.

Las hipótesis de partida son:

- La velocidad desarrollada por los vehículos y las variaciones que experimenta permiten caracterizar el comportamiento de los conductores.

- Este concepto de velocidad a la que operan los conductores es conocido como velocidad de operación y se define como el percentil 85 de la distribución de velocidades obtenida de los vehículos ligeros que circulan en condiciones de flujo libre y sin restricciones ambientales.
- Las velocidades de operación representan el comportamiento de los conductores frente al trazado geométrico de la carretera. De esta manera, en vehículos pesados además del percentil 85, cobra gran importancia en la seguridad vial los percentiles bajos, como el percentil 15, ya que está relacionado con el alcance de los vehículos ligeros.
- La metodología de toma de datos no influye en el comportamiento de los conductores, es decir, estos no se ven influenciados por los dispositivos GPS y, por tanto, los valores de velocidad obtenidos del presente estudio son válidos para estimar las velocidades de operación desarrollada en curvas y rectas.

Las hipótesis de investigación a contrastar con el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Máster son:

1. Las velocidades de operación mínimas de los vehículos pesados en curvas se producen en el punto medio de la misma.
2. Las variables geométricas influyen de manera diferente en la velocidad de los vehículos ligeros y pesados.
3. Las velocidades de operación de los vehículos pesados están principalmente influenciadas por las características mecánicas de los propios vehículos y su relación peso/potencia.
4. La variable más influyente en las velocidades de los vehículos pesados en curvas es el radio.
5. La pendiente, que no tiene influencia en las velocidades de operación de los vehículos ligeros, produce que los vehículos pesados desarrollen velocidades de operación menores en pendientes ascendentes.
6. La diferencia de las velocidades de operación de vehículos pesados en una misma curva son muy bajas para vehículos con relación peso/potencia similar.
7. La dispersión de velocidades de operación es mayor en rectas que en curvas.

5 METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1 METODOLOGÍA

Este trabajo de investigación se basa en perfiles continuos de velocidad de vehículos pesados obtenidos a través de dispositivos de sistemas de posicionamiento global (GPS) de 1 Hz de pequeño tamaño.

En primer lugar, se equipó la flota de camiones de tres empresas con estos dispositivos GPS. A partir de los datos recogidos se obtuvieron los perfiles de velocidad de cada vehículo y se identificaron los tramos de carretera por donde transcurrían las principales rutas de estos vehículos.

Posteriormente, los datos de velocidad fueron reducidos y filtrados con el objetivo principal de identificar y eliminar aquellos conductores que no circulaban bajo condiciones de flujo libre, esta condición se comprobó para cada uno de los conductores mediante la metodología propuesta por Pérez-Zuriaga et al. (2010)

La restitución geométrica de los tramos de carreteras convencionales identificados fue realizada a partir de la metodología propuesta por Camacho-Torregosa et al. (2015). Esto permitió obtener diferentes variables geométricas e índices de trazado para cada curva y recta de los tramos de carretera estudiados.

Finalmente, se analizó la relación entre las velocidades de operación y las variables geométricas e índices de trazado. Como resultado, se desarrollaron múltiples análisis de regresión y se calibraron diferentes modelos para curvas y rectas en base a las características del trazado.

Cabe destacar que los datos de velocidad fueron tomados y depurados por el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC) perteneciente al Instituto del Transporte y Territorio de la Universitat Politècnica de València, al igual que la restitución geométrica y obtención de los estados de alineaciones y rasantes, previamente al desarrollo del presente trabajo. De todas formas, al considerarse parte fundamental para llevar a cabo el presente estudio, en los siguientes epígrafes se incluye la explicación del procedimiento previo desarrollado por el GIIC.

La Figura 5.1 resume la metodología de la investigación.

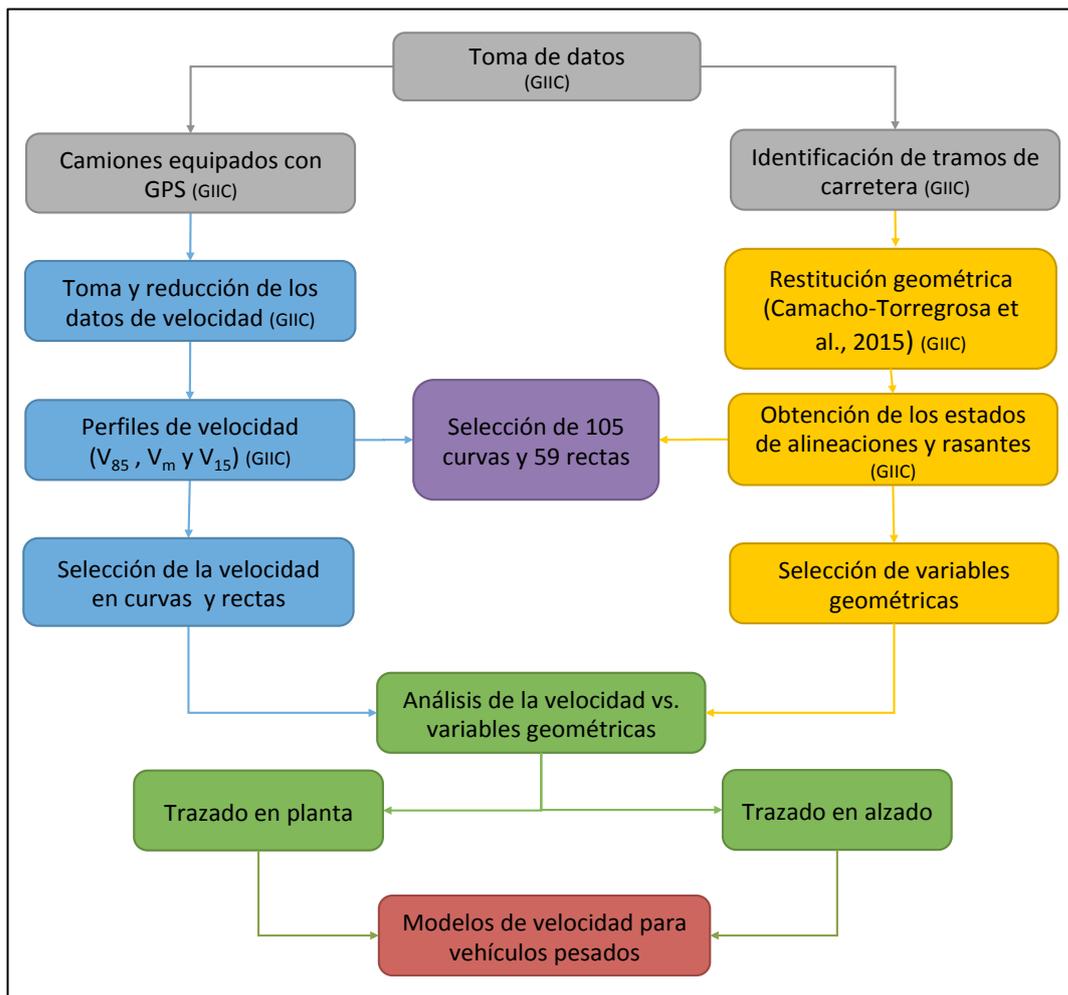


Figura 5.1 Metodología de la investigación

5.2 TOMA DE DATOS

Los datos fueron recogidos entre mayo y junio de 2015 en días laborables y con buenas condiciones meteorológicas, gracias a la colaboración desinteresada de las empresas: Agricultores de la Vega de Valencia (SAV) S.L., Saevi S.L. y Abonos Orgánicos Montagut (AOM) S.L.

Para la toma de datos, se facilitó a las empresas colaboradoras una serie de dispositivos GPS de 1 Hz de pequeño tamaño que, gracias al potente imán que poseen, pueden colocarse en el exterior de la cabina de los vehículos, disminuyendo así la influencia sobre el comportamiento de los conductores (Figura 5.2). Estos dispositivos recogen con una cadencia de un segundo, datos relativos a latitud, longitud, altitud, rumbo, fecha, hora y velocidad.



Figura 5.2 Dispositivo GPS

Las empresas colocaron estos GPS en los vehículos de su flota, registrando de forma continua la velocidad desarrollada por los vehículos durante la realización de su ruta habitual, con viajes de ida y vuelta para cada uno de los tramos de carretera, en un sentido de circulación cargados y en el otro descargados.

Los vehículos pesados que formaron parte del estudio fueron camiones de cinco ejes con remolque tipo bañera o semirremolque. La relación peso/potencia de estos vehículos estuvo entre 35 y 54 kg/kW para camiones descargados, con una media de 43 kg/kW, mientras que la relación peso/potencia para camiones cargados se incrementó hasta 120 kg/kW (Figura 5.3).



Figura 5.3 Camión tipo bañera

5.3 RESTITUCIÓN GEOMÉTRICA DE LOS TRAMOS

La restitución de las secciones de carretera se hizo empleando el programa Autodesk CIVIL 3D. Programa de diseño con un módulo especializado que permite dibujar el trazado de carreteras en planta, en alzado, la sección transversal, los peraltes, la obra lineal con los terraplenes y desmontes que hay

que hacer en caso de que la carretera sea nueva e incluso la visibilidad de la misma teniendo en cuenta el terreno real en el que está emplazada.

Para poder realizar la restitución de la geometría de los tramos de estudio, se necesitó la ortofoto de los lugares en los que estaban emplazadas las carreteras. Esta ortofoto de alta precisión procede del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) y tiene una resolución de 25 cm por píxel. En el caso de la Comunidad Valenciana, que es donde están ubicadas todas las carreteras de este estudio, los datos más actuales fueron recogidos en el año 2015.

Mediante el programa Autodesk CIVIL 3D, sobre la ortofoto se dibujó el trazado en planta de la carretera mediante una polilínea que reflejaba el eje de la calzada con la mayor precisión posible según la calidad que tuviera la ortofoto.

La separación entre los distintos puntos de la polilínea era un aspecto importante a considerar. Como la representación gráfica debía ajustarse lo más posible a la realidad, lo más recomendable era que los puntos estuvieran muy cerca unos de otros principalmente en el caso de las curvas y más separados en las rectas. Hubo que tener cuidado porque en ocasiones era difícil identificar ciertas curvas de radios muy amplios siendo fácil que estas se consideraran como rectas y la precisión no fuera la adecuada. En caso de duda, lo más conveniente era dibujar con una densidad de puntos elevada (Figura 5.4).



Figura 5.4 Polilínea sobre el eje de la calzada con baja densidad de puntos

Una vez localizados los puntos de inicio y fin de los tramos en las ortofotos correspondientes, se procedió a representar el eje teniendo en cuenta que, en el caso de las rectas, los puntos podían tener una separación mayor, a

diferencia de las curvas, en las que para obtener una buena precisión era necesario que estuvieran más juntos (Figura 5.5).

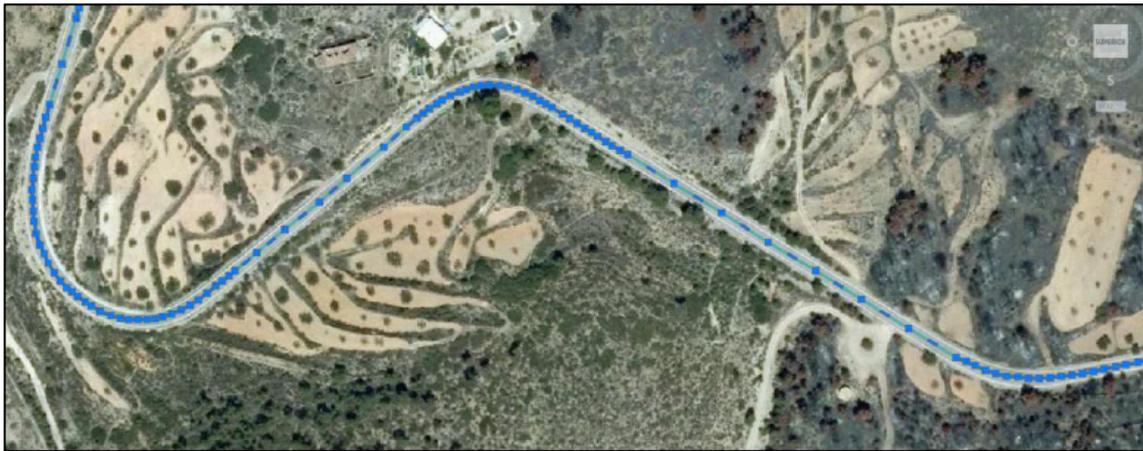


Figura 5.5 Representación del eje sobre la ortofoto

Posteriormente, las coordenadas (x,y) del eje obtenidas en el programa Autodesk CIVIL 3D se exportaron al programa REVEL. De esta forma, se transformaron las coordenadas y se obtuvieron sus datos metro a metro, luego mediante el diagrama de azimuts se obtuvo una alineación preliminar del trazado en planta (Figura 5.6 y Figura 5.7).

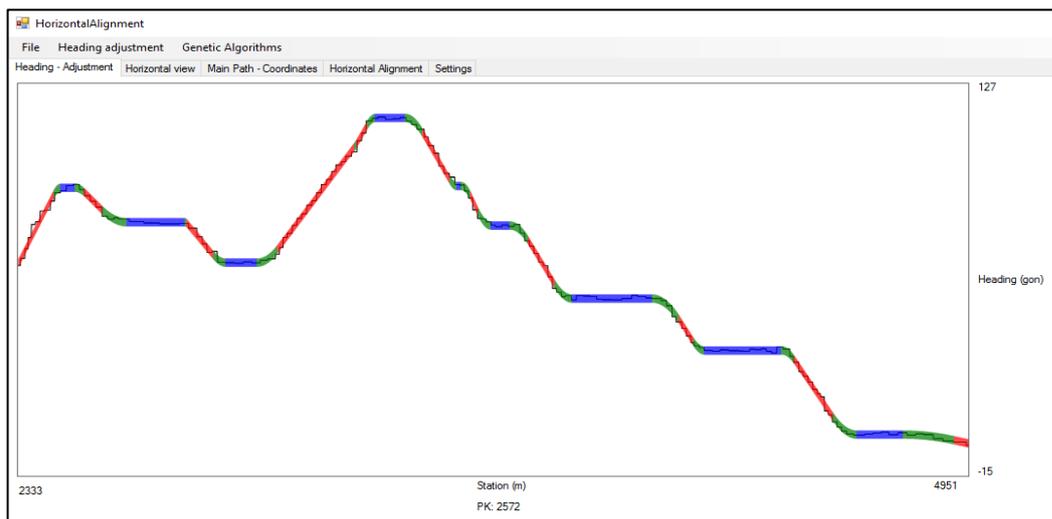


Figura 5.6 Identificación de elementos geométricos en REVEL



Figura 5.7 Ajuste de la geométrica en REVEL

Por último, mediante un segundo ajuste por algoritmos genéticos se obtuvo los estados de alineaciones definitivos (Figura 5.8).

Id	Order	Type	PKInitial	PKFinal	Length	Radius	Parameter	InitialHeading	FinalHeading
1	1	1	0	447	447	0	0	56.72336531787...	56.72200725540...
2	2	3	447	529	82	0	-155.415866462...	56.72200725540...	47.81447554925...
3	3	2	529	724	195	0	-294.562092053...	47.81447554925...	5.662122696691...
4	4	3	724	782	58	0	-130.708076793...	5.662122696691...	-0.31525620069...
5	5	1	782	1102	320	0	0	-0.31525620069...	-0.31390812499...
6	6	3	1102	1187	85	0	157.7419021855...	-0.31390812499...	8.761300747196...
7	7	2	1187	1352	165	0	292.7353847660...	8.761300747196...	44.627232421819...
8	8	3	1352	1389	37	0	104.0730956412...	44.627232421819...	48.56693275962...
9	9	1	1389	1434	45	0	0	48.56693275962...	48.56531305373...
10	10	3	1434	1486	52	0	-140.495263927...	48.56531305373...	44.01879863910...
11	11	2	1486	1734	248	0	-379.594599729...	44.01879863910...	2.581670856195...
12	12	3	1734	1793	59	0	-151.899147286...	2.581670856195...	-2.22056491951...
13	13	1	1793	1839	46	0	0	-2.22056491951...	-2.2185732786...
14	14	3	1839	1890	51	0	124.3207782553...	-2.2185732786...	3.583789751595...
15	15	2	1890	2093	203	0	303.0520765884...	3.583789751595...	46.00993439164...
16	16	3	2093	2142	49	0	124.1033428705...	46.00993439164...	50.96814653941...
17	17	1	2142	2209	67	0	0	50.96814653941...	50.96199848223...
18	18	3	2209	2231	22	0	-72.3290959936...	50.96199848223...	47.72197234520...
19	19	2	2231	2328	97	0	-237.795130077...	47.72197234520...	21.4895786743...
20	20	3	2328	2346	18	0	-65.4240960303...	21.4895786743...	19.31794814585...
21	21	1	2346	3114	768	0	0	19.31794814585...	19.31728413106...
22	22	3	3114	3180	66	0	-243.348108184...	19.31728413106...	17.30996742819...
23	23	2	3180	3261	81	0	-897.246996317...	17.30996742819...	11.43034888931...
24	24	3	3261	3294	33	0	-172.073097486...	11.43034888931...	10.06689412522...
25	25	1	3294	3963	369	0	0	10.06689412522...	10.0653671219...

Figura 5.8 Estados de alineaciones

Atendiendo a la restitución en alzado, se emplearon las nubes de puntos de la cartografía LIDAR del terreno con una densidad de 0,5 puntos/m² que proporcionan información altimétrica con una precisión de 20 cm.

De esta manera, se identificaron y restituyeron un total de 12 tramos de carretera convencional caracterizados con un ancho del carril entre 3,0 y 3,5 m, y arcén entre 1,0 y 1,5 m (Tabla 5.1).

En el Anexo II se pueden consultar los estados de alineaciones y de rasantes de los tramos estudiados.

Tabla 5.1 Tramos de estudio

Carretera	Nombre de la sección	Longitud (m)	Rango de pendiente (%)
CV-425	Buñol - Alborache	1.956	-8 +6
CV-425	Alborache - CV-425_CV-4252	752	-3 +6
CV-425	Macastre I - Macastre II	1.419	-5 +2
CV-425	CV-425_CV-580 - La Matrona I	1.062	-1 +8
CV-425	Macastre II - CV-425_CV-580	11.996	-9 +11
CV-425	La Matrona I - La Matrona II	5.836	-12 +12
CV-345	Villar del Arzobispo - Higuieruelas	7.215	-5 +8
CV-600	Xávida - Fenollet	2.685	-2 +2
CV-610	Genovés - Cuatretonda	7.304	-8 +10
CV-610	Cuatretonda - Llutxent	2.686	-3 +10
CV-608	Llutxent - Planta	1.660	-8 +8
CV-610	Llutxent - CV-610_CV-60	5.685	-5 +6

5.4 OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LA VELOCIDAD

Sobre los trazados restituidos, se proyectó los perfiles continuos de velocidad individuales obtenidos por medio del software REVEL desarrollado por el Grupo de Investigación de Ingeniería de Carreteras (GIIC). De esta manera, se obtuvieron los perfiles de cada uno de los percentiles.

Posteriormente, se comprobó la condición de flujo libre para cada uno de los conductores mediante la metodología propuesta por Pérez-Zuriaga et al. (2010), la cual se basa en la hipótesis de que cada conductor se comporta de una forma particular, aproximándose su perfil de velocidad individual al de un percentil concreto. Por tanto, cuando el perfil individual de un conductor sufre un cambio repentino del percentil que está describiendo se considera que está condicionado (Figura 5.9).

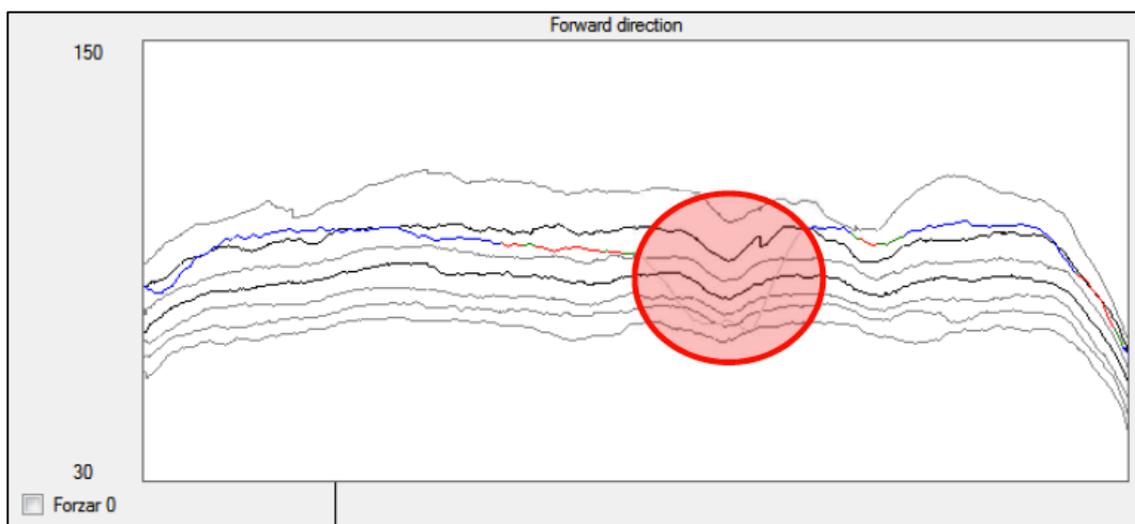


Figura 5.9 Ejemplo de circulación condicionada

Después de eliminar las secciones que no se encontraban en condiciones de flujo libre para cada conductor, se obtuvieron los diferentes perfiles de velocidad para cada tramo de carretera. La Figura 5.10 muestra los perfiles de velocidad de distintos percentiles para el tramo CV-425: Buñol – Alborache, los perfiles de los demás tramos se pueden consultar en el Anexo III.

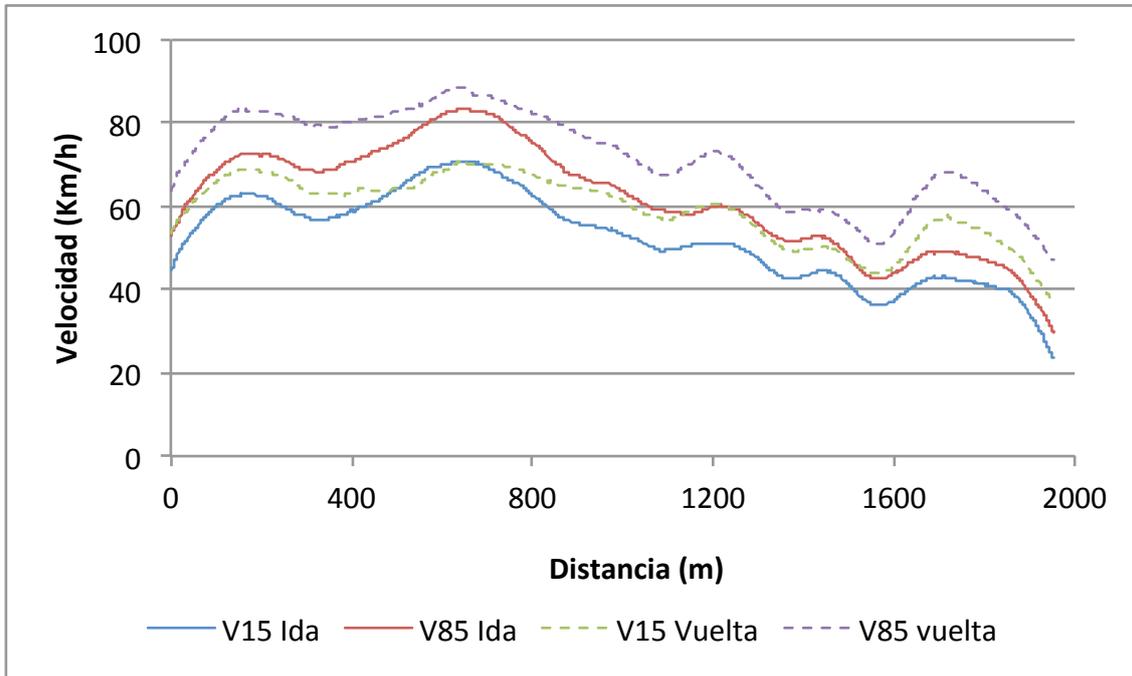


Figura 5.10 Perfil de velocidad del tramo CV-425: Buñol – Alborache

5.5 VARIABLES CONSIDERADAS

Este apartado presenta las variables geométricas y los índices de trazado que fueron relacionados con la velocidad de operación en curvas y rectas durante el análisis del presente trabajo. Las variables geométricas fueron obtenidas directamente de la restitución geométrica de los tramos de estudio, mientras que los índices del trazado se definen a partir de la combinación de diferentes variables geométricas.

- Curva:
 - Longitud de la curva (m): L_C
 - Ángulo de deflexión (gon): γ
 - Pendiente (%): p (en el punto de curvatura, en el punto medio de la curva, en el final de la curva y la pendiente media de la curva)
 - Curva Circular:
 - Radio (m): R
 - Curvatura: la inversa del radio (m^{-1}): Γ
 - Longitud de la curva circular (m): L_{CC}
 - Clotoide anterior/posterior:
 - Longitud de la clotoide (m): L_{CL}

- Parámetro de la clotoide (m): A
- Recta:
 - Longitud de la recta (m): L_R
 - Pendiente (%) : p (longitudinal ponderada)

Los índices de trazado estudiados fueron definidos a partir de la tasa de cambio de curvatura (*Curvature Change Ratio*, *CCR*). Este índice indica la sinuosidad de un elemento geométrico o tramo de carretera. La ecuación 2 muestra su cálculo.

$$CCR = \frac{|\sum \gamma|}{L} \quad (2)$$

Donde:

CCR : tasa de cambio de curvatura del tramo (gon/km)

γ : ángulo girado por el elemento geométrico o tramo de carretera (gon)

L : longitud del elemento geométrico o tramo de carretera (km)

Esta ecuación se aplica adaptándola a cada uno de los supuestos de tasa de cambio de curvatura relacionados a continuación, sustituyendo el ángulo girado y la longitud por los valores correspondientes en cada caso.

- Tasa de cambio de curvatura de la curva, incluyendo a la curva circular y las curvas de transición: CCR_c
- Tasa de cambio de curvatura considerando la recta anterior y la curva: CCR_{r_c}
- Tasa de cambio de curvatura considerando la recta y las dos curvas adyacentes: $CCR_{c_r_c}$
- Tasa de cambio de curvatura considerando la curva precedente y la recta: CCR_{c_r}
- Tasa de cambio de curvatura del tramo homogéneo de carretera: CCR

Para el último caso, se requiere la tramificación de la carretera. La metodología de tramificación empleada se basó en el propio índice CCR , que consiste en realizar un gráfico del ángulo de deflexión acumulado en función de la distancia. De esta manera, los límites de cada tramo se identifican a partir de cambios bruscos de la pendiente en este diagrama, ya que la pendiente de cada tramo describe el CCR del mismo.

La Figura 5.11 muestra la tramificación llevada a cabo para el tramo de la carretera CV-610: Genovés - Cuatretont. Los resultados de la tramificación llevada a cabo para cada el resto de los tramos de carretera de estudio se muestran en el Anexo II.

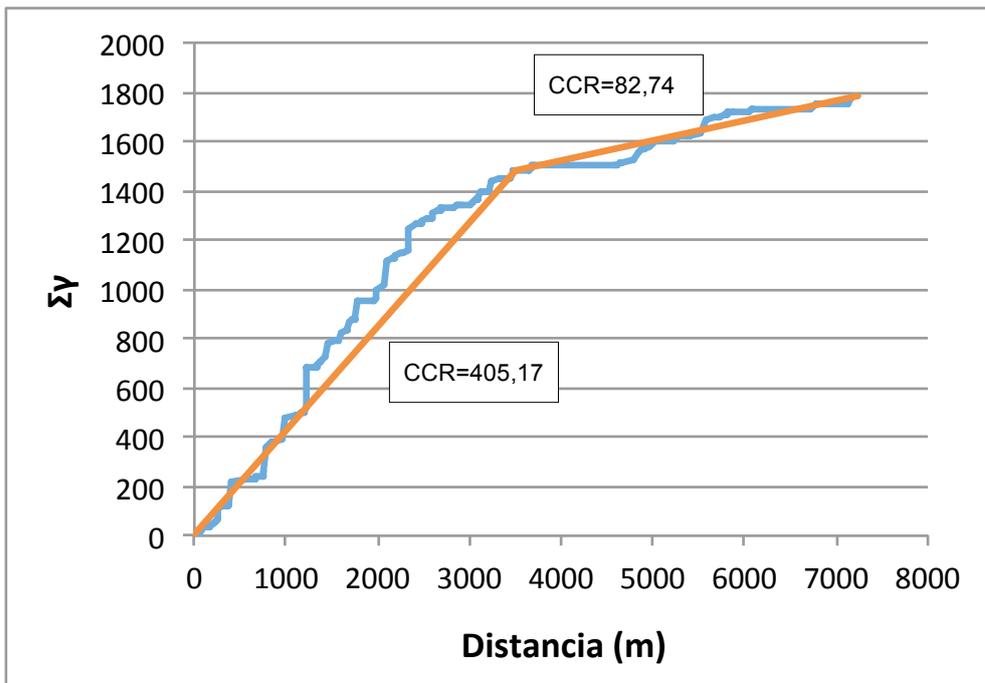


Figura 5.11 Tramificación según el CCR, tramo CV-610: Genovés - Cuatretont

Por último, para el análisis en rectas se tuvo en cuenta una variable operacional:

- Velocidad de la curva precedente (km/h): V_{cp}

5.6 SELECCIÓN DE CURVAS

La selección de las curvas se llevó a cabo mediante el análisis de los diferentes perfiles de velocidad. Solo las curvas aisladas, es decir, aquellas que actúan como un control geométrico sobre los conductores, fueron seleccionadas para el desarrollo de los modelos de velocidad. Esta elección está basada en la necesidad de que en una curva se produzca un mínimo de velocidad de tal forma que no se vea influenciada por los elementos geométricos adyacentes. Así, las curvas fueron identificadas a través de una reducción significativa de la velocidad, lo que se traduce en un valle o U en el perfil de velocidad (Figura 5.12).

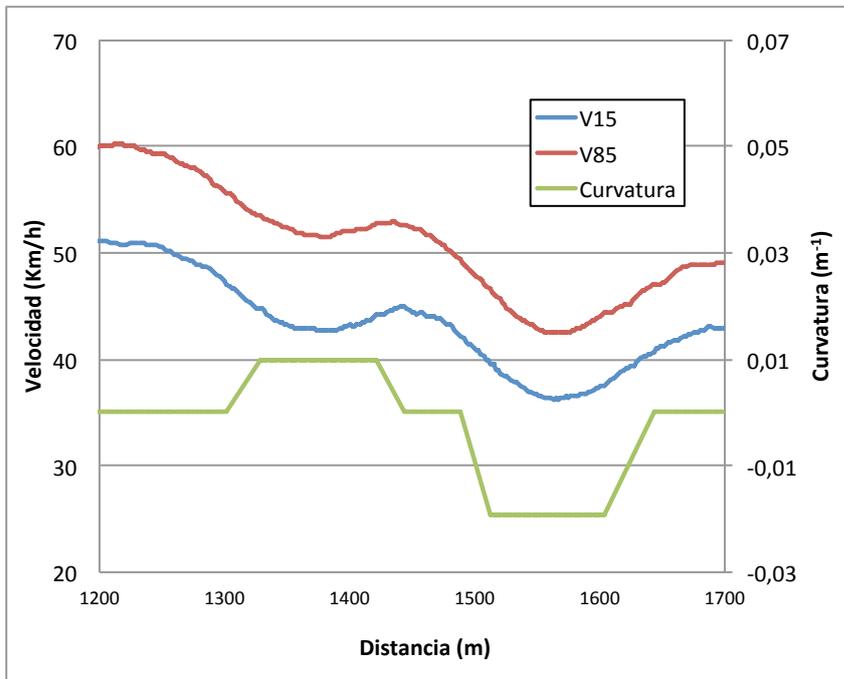


Figura 5.12 Selección de curvas

Como resultado, 105 curvas fueron consideradas en este estudio. En cuanto a sus características geométricas, en la Tabla 5.2 se presentan los intervalos entre los que varían las más representativas. En el Anexo IV se muestra el resto de características geométricas de las curvas evaluadas (longitud de la curva circular, parámetro de la clotoide de entrada, longitud de la clotoide, parámetro de la clotoide de salida, longitud de la clotoide de salida, CCR de la curva y CCR de la recta anterior-curva).

Tabla 5.2 Características geométricas de las curvas utilizadas en el estudio

Variable	Notación	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar
Radio (m)	R	18,45	1.178,36	167,43	228,52
Longitud de la curva (m)	L	32,00	250,00	94,50	47,35
Angulo de deflexión (gon)	γ	3,94	159,82	51,57	37,46
Longitud de la recta precedente (m)	L_t	7	1.359	194	214
Tasa de cambio de curvatura (gon/km)	CCR	41,51	2.464,65	618,21	449,34
Pendiente en el punto de curvatura (%)	p	-11,31	11,31	-0,04	4,68

5.7 SELECCIÓN DE LA RECTAS

La realización del estudio de la velocidad en tramos rectos se llevó a cabo a partir de aquellas rectas en las que se alcanzaba una velocidad estable, fuera de las zonas de aceleración y deceleración.

En general, en los tramos de recta demasiado cortos no se llega a desarrollar totalmente la velocidad propia de la recta. Además, esta situación no depende únicamente de la longitud de la recta sino también de las características de las curvas adyacentes, por lo que no pueden elegirse las rectas considerando sólo su longitud.

De esta manera, los tramos rectos de carretera utilizados en este estudio se han identificado a partir de los perfiles continuos de velocidad, seleccionando aquellos en los que la velocidad se mantiene constante durante una cierta parte de ellos, diferenciándose claramente de los tramos de aceleración y deceleración. Debido a la gran casuística posible ha sido necesario analizar el perfil de velocidad recta a recta (Figura 5.13).

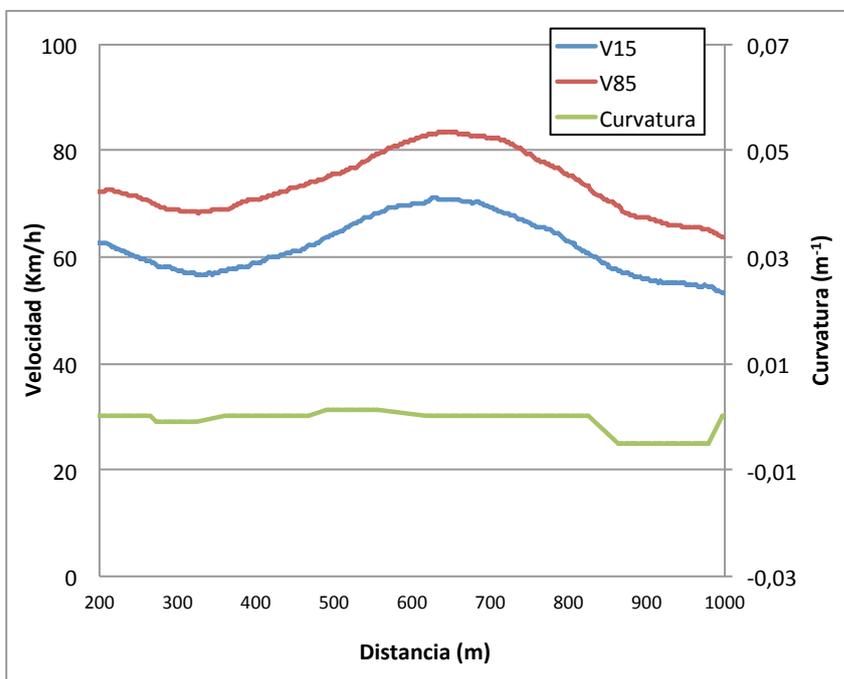


Figura 5.13 Selección de rectas

Como resultado, 59 rectas fueron consideradas en este estudio, cuyas características geométricas se muestran en la Tabla 5.3. En el Anexo V se muestra el resto de características geométricas de las rectas evaluadas (radio de la curva anterior y posterior, longitud de la curva anterior y posterior, ángulo de deflexión de la curva anterior y posterior, longitud de la curva circular anterior y posterior, parámetro de la clotoide de entrada de la curva anterior y posterior, longitud de la clotoide de la curva anterior y posterior, parámetro de

la clotoide de salida de la curva anterior y posterior y longitud de la clotoide de salida de la curva anterior y posterior, CCR de la curva anterior-recta-curva posterior, CCR de la curva anterior-recta y CCR de la curva).

Tabla 5.3 Características geométricas de las rectas utilizadas en el estudio

Variable	Notación	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar
Longitud de la recta (m)	L	30,00	1.359,00	163,13	299,39
Pendiente longitudinal ponderada (%)	p	-10,64	10,64	0,44	5,45
Radio curva anterior (m)	R_{C1}	26,00	796,00	89,81	135,00
Radio curva posterior (m)	R_{C2}	26,00	458,00	81,54	91,80
Tasa de cambio de curvatura (gon/km)	CCR	65,6	1.152,71	341,94	211,86

6 ANÁLISIS

La operación de los vehículos se puede caracterizar por su perfil de velocidad obtenido de las tomas de datos de campo. Con estos perfiles, es posible desarrollar modelos que permitan predecir el comportamiento de los conductores a lo largo del trazado en función de las características geométricas del mismo. De esta forma, el desarrollo de estos modelos permitirá incorporar la interacción entre vehículos ligeros y pesados en el análisis de la consistencia del diseño geométrico.

En este estudio, el análisis se ha llevado a cabo tanto para curvas como para rectas. Este se ha realizado a partir de las variables geométricas relacionadas con el trazado en planta y en alzado, los índices de trazado y las variables operacionales de los 12 tramos de carretera estudiados.

6.1 ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN CURVAS

La mayor parte de los estudios relacionados con el estudio de la velocidad en curvas y la calibración de modelos de estimación de la velocidad de operación en este tipo de elemento geométrico se basan en la observación puntual de la velocidad habitualmente en el punto medio de la curva, considerando que es en ese punto donde se produce la velocidad mínima. Sin embargo, esta hipótesis no ha sido contrastada.

En este estudio, antes de estudiar la velocidad mínima en las curvas se va a realizar un estudio estadístico para confirmar si la hipótesis anterior puede ser estadísticamente aceptada o no. Para ello, al disponer de datos continuos de velocidad individuales para cada uno de los conductores, se ha realizado una comparativa entre las siguientes variables (Figura 6.1):

- $V_{85\text{ctro}}$: Percentil 85 de la velocidad registrada en el centro de la curva.
- $V_{85\text{min}}$: Velocidad mínima del percentil 85 a lo largo de la curva.

La comparación entre ellas se realizó mediante un test de hipótesis entre datos pareados. Para cada curva, se formularon las siguientes hipótesis: (a) hipótesis nula $H_0: V_{85\text{ctro}} - V_{85\text{min}} = 0$; (b) hipótesis alternativa $H_1: V_{85\text{ctro}} - V_{85\text{min}} \neq 0$. El nivel de confianza considerado fue del 95%.

Como resultado, la hipótesis nula fue rechazada ($t=8,82536$; $P\text{-Value}=0$), por lo que la $V_{85\text{ctro}}$ y la $V_{85\text{min}}$ no pueden ser consideradas estadísticamente similares con un nivel de confianza del 95% (Tabla 6.1).

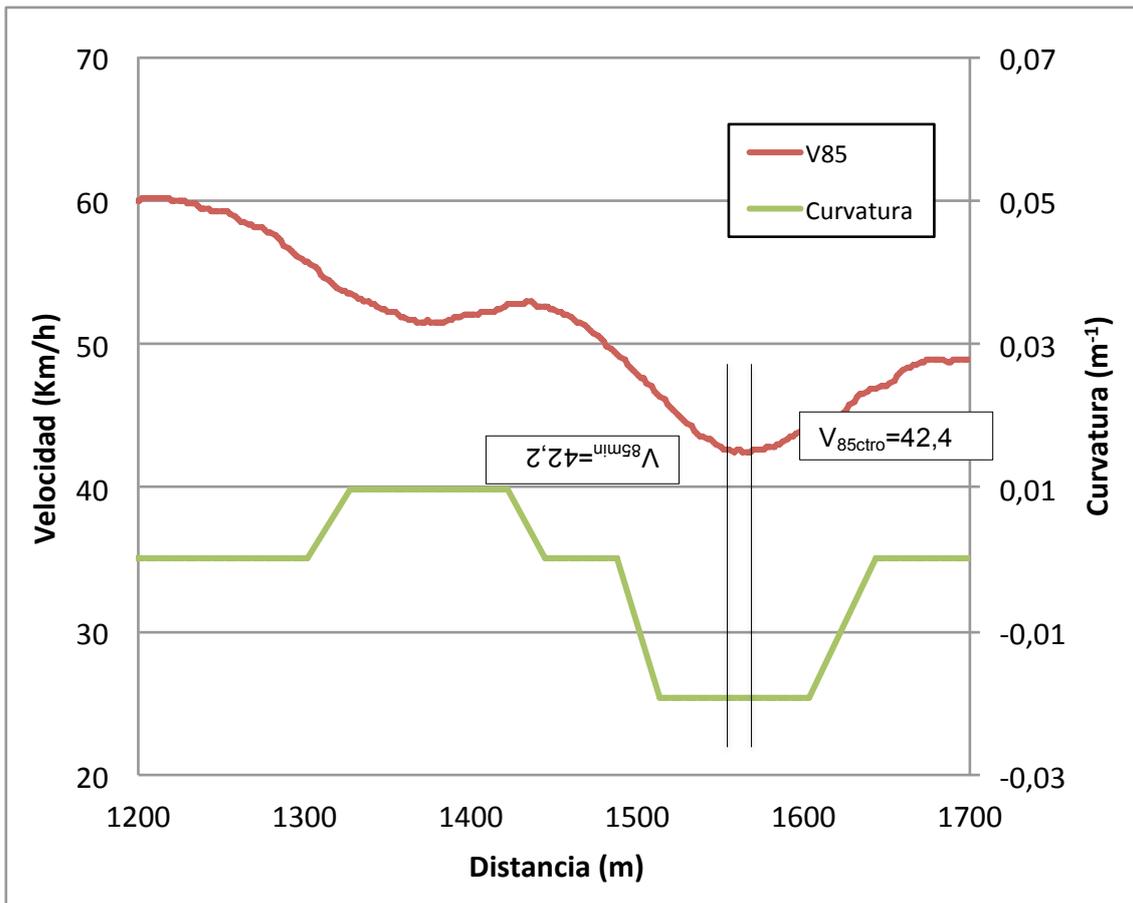


Figura 6.1 Ejemplo V_{85ctro} vs. V_{85min} del tramo CV-425: Buñol - Alborache

Tabla 6.1 Comparación de datos pareados V_{85ctro} vs. V_{85min}

Comparación de Medias				
Estadística Descriptiva				
VAR	Tamaño muestral	Media	Desviación Típica	Varianza
V_{85_ctro}	105	58,70356	17,26494	298,07807
V_{85_min}	105	58,09102	17,2848	298,76416
Prueba t dependiente para muestras apareadas				
Grados de Libertad	104			
Diferencia de Medias Hipotetizada	0,			
Varianza Combinada	298,42112			
Estadístico de la Prueba	8,82536			
Coefficiente de correlación de Pearson	0,99915			
Distribución de Dos Colas				
Valor p	0,	Valor Crítico (5%)	1,98304	
Distribución de Una Cola				
Hipótesis alternativa H_1 : $\mu > \mu_0$ - Menos que (cola izquierda)				
Valor p	0,	Valor Crítico (5%)	1,65964	
Criterio G				
Estadístico de la Prueba	0,00978	Valor Crítico (5%)	0,143	
Valor p	0,16485			
Criterio de Pagurova				
Parámetro de relación de varianzas	0,49943			
Estadístico de la Prueba	0,25692	Valor Crítico (5%)	0,06278	
Valor p	0,20251			

El mismo procedimiento fue realizado para la velocidad media (Tabla 6.2) y la velocidad del percentil 15 (Tabla 6.3) obteniendo los mismos resultados. Por lo tanto, las velocidades de operación que fueron utilizadas para llevar a cabo el

análisis que se presenta en los siguientes apartados y para la calibración de los modelos fue la velocidad mínima desarrollada a lo largo de la curva.

Tabla 6.2 Comparación de datos pareados V_{mctro} vs. V_{mmin}

Comparación de Medias					
Estadística Descriptiva					
VAR	Tamaño muestral	Media	Desviación Típica	Varianza	
Vm_ctro	105	54,49305	16,61315	275,99663	
Vm_min	105	53,96987	16,59938	275,53929	
Prueba t dependiente para muestras apareadas					
Grados de Libertad	104				
Diferencia de Medias Hipotetizada	0,				
Varianza Combinada	275,76796				
Estadístico de la Prueba	8,52657				
Coefficiente de correlación de Pearson	0,99928				
Distribución de Dos Colas					
Valor p	0, Valor Crítico (5%)			1,98304	
Distribución de Una Cola					
Hipótesis alternativa H1: $\mu < \mu_0$ - Menos que (cola izquierda)					
Valor p	0, Valor Crítico (5%)			1,65964	
Criterio G					
Estadístico de la Prueba	0,00859	Valor Crítico (5%)		0,143	
Valor p	0,16587				
Criterio de Pagurova					
Parámetro de relación de varianzas	0,50041				
Estadístico de la Prueba	0,22828	Valor Crítico (5%)		0,06278	
Valor p	0,18034				

Tabla 6.3 Comparación de datos pareados V_{15ctro} vs. V_{15min}

Comparación de Medias					
Estadística Descriptiva					
VAR	Tamaño muestral	Media	Desviación Típica	Varianza	
V15_ctro	105	50,44209	16,13652	260,38729	
V15_min	105	49,8649	16,07475	258,39761	
Prueba t dependiente para muestras apareadas					
Grados de Libertad	104				
Diferencia de Medias Hipotetizada	0,				
Varianza Combinada	259,39245				
Estadístico de la Prueba	8,37454				
Coefficiente de correlación de Pearson	0,99905				
Distribución de Dos Colas					
Valor p	0, Valor Crítico (5%)			1,98304	
Distribución de Una Cola					
Hipótesis alternativa H1: $\mu < \mu_0$ - Menos que (cola izquierda)					
Valor p	0, Valor Crítico (5%)			1,65964	
Criterio G					
Estadístico de la Prueba	0,00935	Valor Crítico (5%)		0,143	
Valor p	0,16521				
Criterio de Pagurova					
Parámetro de relación de varianzas	0,50192				
Estadístico de la Prueba	0,25967	Valor Crítico (5%)		0,06278	
Valor p	0,20462				

6.1.1 Análisis del tamaño de muestra en curvas

El número de conductores requeridos para cada curva también fue analizado. Para ello, se utilizó la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z^2 \cdot \sigma^2}{e^2} \quad (3)$$

Donde:

n = número de conductores requeridos

Z = constante dependiente del nivel de confianza que se obtiene de la tabla de distribución normal, en este caso 1,96 para un nivel de confianza del 95%

σ = desviación típica de la velocidad (km/h)

e = error asumido (2 km/h)

En la Tabla 6.4 se presenta el tamaño de muestra necesaria para las 105 curvas seleccionadas.

Tabla 6.4 Tamaño de la muestra necesaria para las curvas

Curva	Desviación típica	Muestra real	Muestra necesaria
C01I01	1,619698	134	1
C01I04	1,887107	131	2
C01V01	3,083117	101	5
C01V02	2,188666	95	3
C01V03	1,263411	101	1
C01V05	0,891389	100	1
C02I02	1,529766	129	1
C02I03	1,900824	122	2
C02I04	2,080915	113	2
C02V01	1,021500	98	1
C02V03	1,406962	90	1
C04I01	3,234806	128	6
C04V01	0,822332	126	1
C05I02	0,700958	130	1
C05I03	0,554235	129	1
C05I05	0,489370	128	1
C05I07	2,157547	128	2
C05I08	1,128547	128	1
C05I09	0,625151	130	1
C05I10	1,086706	128	1
C05I13	0,567069	130	1
C05I15	1,704825	127	2
C05I16	5,657453	129	17
C05I17	0,751278	128	1
C05I19	0,385837	127	1
C05I21	2,286096	130	3
C05I22	2,418697	127	3
C05I23	1,397594	130	1
C05I24	1,694959	130	2
C05I25	0,372696	130	1
C05I27	0,783074	128	1
C05I29	0,584257	129	1
C05I30	0,434500	130	1
C05I31	1,134476	129	1

C05V01	3,167820	125	5
C05V04	0,901192	125	1
C05V05	1,543982	126	1
C05V07	1,807088	125	2
C05V08	1,585607	125	1
C05V09	0,900071	125	1
C05V11	9,101509	123	44
C05V12	4,017122	123	9
C05V14	7,184157	126	27
C05V15	1,780349	124	2
C05V16	1,572190	124	1
C05V20	0,547137	125	1
C05V21	2,561032	124	3
C05V22	1,891465	124	2
C05V23	2,938896	126	5
C05V24	2,720202	125	4
C05V26	2,464303	123	3
C05V28	1,150963	124	1
C07I01	0,867467	132	1
C07I03	0,545118	133	1
C07I06	0,789641	133	1
C07I08	1,168449	132	1
C07V02	0,798341	111	1
C07V04	0,998045	125	1
C07V05	2,597581	126	4
C07V07	1,902658	123	2
C08V01	2,366004	22	3
C08V02	4,662572	22	12
C08V03	2,861476	20	4
C08V04	1,785641	21	2
C09I01	2,987480	14	5
C09I02	1,635424	13	1
C09I03	1,225889	14	1
C09I04	1,264549	14	1
C09I05	2,223859	14	3
C09I06	1,632333	14	1
C09I08	0,736457	14	1
C09I09	0,967340	13	1
C09I10	0,768933	14	1
C09I11	2,047208	14	2
C09I12	1,104023	14	1
C12I01	2,722119	10	4
C12V01	4,641608	10	11
C13V01	3,310780	13	6
C15I02	2,185990	25	3
C15I04	2,428524	25	3
C15I05	1,504637	25	1
C15I06	1,905887	25	2

C15V01	3,425624	24	6
C15V03	2,197531	24	3
C16I02	1,440117	23	1
C16I03	0,761468	23	1
C16I05	2,354868	23	3
C16I06	2,609230	23	4
C16I07	2,296333	23	3
C16V01	1,055372	24	1
C16V02	1,406656	24	1
C16V04	1,577906	24	1
C16V05	1,679241	24	2
C16V06	2,858045	24	4
C17I01	3,093626	39	5
C17V02	4,457484	39	11
C18I01	0,642590	15	1
C18I04	2,878226	15	4
C18I06	4,833026	15	12
C18I08	1,025380	15	1
C18V02	3,393925	14	6
C18V03	3,490027	14	6
C18V05	0,990733	14	1
C18V07	0,753706	14	1
C18V09	2,135864	14	2

El resultado arrojó que el número de conductores requeridos en la mayoría de las curvas seleccionadas era menor a 10. Esto se debió principalmente a la baja desviación típica de la velocidad, que presentó un valor medio de 1,96 km/h. No obstante, la media del número de observaciones por curva fue aproximadamente de 80 conductores.

6.1.2 Análisis descriptivo: velocidad del percentil 85

El análisis de la relación entre la velocidad del percentil 85 en curvas y las variables se llevó a cabo a través de la velocidad mínima del percentil 85 (V_{85min}) observada a lo largo de cada curva de estudio, que fue identificada para cada curva a partir de los perfiles de velocidad del percentil 85 de cada tramo de carretera estudiado.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis preliminar de correlación donde se identificó las variables geométricas del trazado en planta e índices del trazado que presentaban una mayor influencia sobre la velocidad del percentil 85 (V_{85}). Pero una vez representados los datos, se presentaron dos tendencias claramente diferenciadas, que estaban relacionadas con camiones cargados y descargados, por lo que se decidió realizar el análisis de correlación para camiones cargados y descargados de manera separada (Tabla 6.5 y Tabla 6.6).

Tabla 6.5 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 85: camiones cargados

VARIABLES		V85 (km/h)	R (m)	γ (gon)	Γ (m-1) x1000	LC (m)	LCC (m)	ACL1 (m)	LCL1 (m)	ACL2 (m)	LCL2 (m)	LR (m)	CCRc (gon/km)	CCRr_c (gon/km)	CCR (gon/km)	
V85 (km/h)	R	1														
	Valor P															
R (m)	R	0,51608	1													
	Valor P	0,00006														
γ (gon)	R	-0,67364	-0,52664	1												
	Valor P	2,37E-08	0,00004													
Γ (m-1) x1000	R	-0,77657	-0,62632	0,66477	1											
	Valor P	5,17E-12	4,07E-07	4,20E-08												
LC (m)	R	-0,01718	0,23492	0,36986	-0,24886	1										
	Valor P	0,90186	0,08728	0,00591	0,06959											
LCC (m)	R	-0,03164	0,20153	0,42259	-0,19996	0,9117	1									
	Valor P	0,82033	0,14393	0,00146	0,14715	0										
ACL1 (m)	R	0,50617	0,87338	-0,44244	-0,65514	0,39825	0,28	1								
	Valor P	0,00009	0	0,00081	7,65E-08	0,00286	0,0403									
LCL1 (m)	R	-0,00222	0,13709	0,20324	-0,13384	0,5125	0,25526	0,53517	1							
	Valor P	0,98729	0,32289	0,14049	0,33463	0,00007	0,06248	0,00003								
ACL2 (m)	R	0,41387	0,68749	-0,37898	-0,58113	0,5548	0,38609	0,61888	0,14862	1						
	Valor P	0,00186	9,35E-09	0,00471	4,08E-06	0,00001	0,00393	6,10E-07	0,28348							
LCL2 (m)	R	0,01898	0,17047	0,04317	-0,22008	0,663	0,39924	0,18086	0,21475	0,74579	1					
	Valor P	0,89167	0,2178	0,75658	0,1098	4,70E-08	0,00278	0,19062	0,1189	9,77E-11						
LR (m)	R	0,25727	0,06803	-0,18456	-0,2349	0,11114	-0,01796	0,13844	0,05614	0,24785	0,34108	1				
	Valor P	0,06037	0,62501	0,18154	0,08731	0,42365	0,89741	0,31812	0,68679	0,07077	0,0116					
CCRc (gon/km)	R	-0,44789	-0,45675	0,39297	0,22174	0,07159	0,05478	-0,37557	0,12939	-0,32614	-0,00439	-0,06544	1			
	Valor P	0,00068	0,00052	0,00329	0,10708	0,60694	0,69399	0,00513	0,35108	0,01609	0,97487	0,63828				
CCRr_c (gon/km)	R	-0,63225	-0,48412	0,80497	0,63072	0,15917	0,21937	-0,44753	0,06312	-0,40365	-0,04551	-0,37177	0,27957	1		
	Valor P	2,93E-07	0,00021	0	3,19E-07	0,2503	0,11098	0,00069	0,65025	0,00247	0,74384	0,00564	0,04062			
CCR (gon/km)	R	-0,77528	-0,47004	0,57228	0,63092	-0,02933	0,02881	-0,44975	0,00173	-0,40557	-0,15726	-0,25053	0,35026	0,63884	1	
	Valor P	5,90E-12	0,00034	6,15E-06	3,15E-07	0,83328	0,83616	0,00064	0,99008	0,00235	0,25611	0,06767	0,00942	2,01E-07		

Tabla 6.6 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 85: camiones descargados

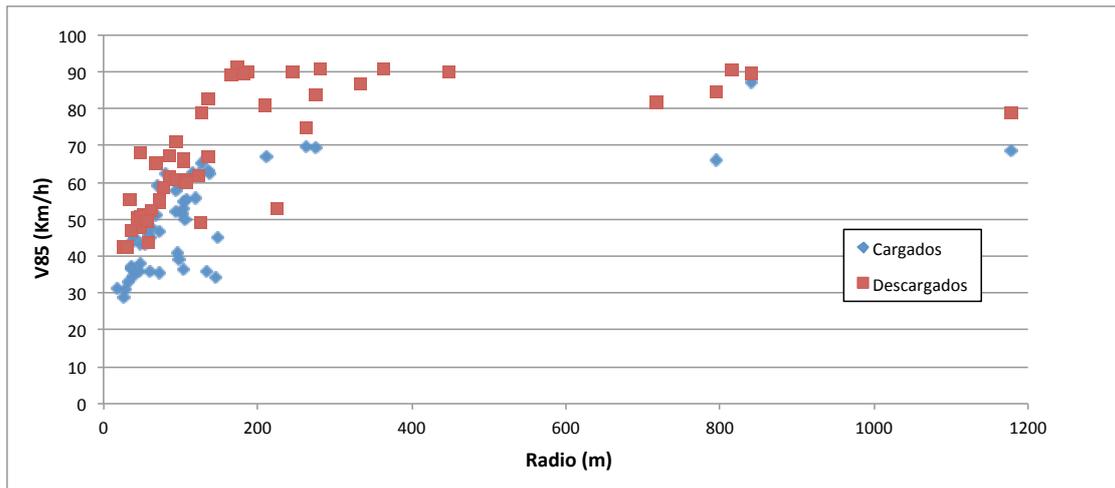
VARIABLES		V85 (km/h)	R (m)	γ (gon)	Γ (m-1) x1000	LC (m)	LCC (m)	ACL1 (m)	LCL1 (m)	ACL2 (m)	LCL2 (m)	LR (m)	CCRc (gon/km)	CCRr_c (gon/km)	CCR (gon/km)	
V85 (km/h)	R	1														
	Valor P															
R (m)	R	0,58848	1													
	Valor P	2,87E-06														
γ (gon)	R	-0,71226	-0,52664	1												
	Valor P	1,54E-09	0,00004													
Γ (m-1) x1000	R	-0,80706	-0,62632	0,66477	1											
	Valor P	0	4,07E-07	4,20E-08												
LC (m)	R	0,01667	0,23492	0,36986	-0,24886	1										
	Valor P	0,90476	0,08728	0,00591	0,06959											
LCC (m)	R	0,00125	0,20153	0,42259	-0,19996	0,9117	1									
	Valor P	0,99285	0,14393	0,00146	0,14715	0										
ACL1 (m)	R	0,56101	0,87338	-0,44244	-0,65514	0,39825	0,28	1								
	Valor P	0,00001	0	0,00081	7,65E-08	0,00286	0,0403									
LCL1 (m)	R	-0,02641	0,13709	0,20324	-0,13384	0,5125	0,25526	0,53517	1							
	Valor P	0,84967	0,32289	0,14049	0,33463	0,00007	0,06248	0,00003								
ACL2 (m)	R	0,4949	0,68749	-0,37898	-0,58113	0,5548	0,38609	0,61888	0,14862	1						
	Valor P	0,00014	9,35E-09	0,00471	4,08E-06	0,00001	0,00393	6,10E-07	0,28348							
LCL2 (m)	R	0,07064	0,17047	0,04317	-0,22008	0,663	0,39924	0,18086	0,21475	0,74579	1					
	Valor P	0,61175	0,2178	0,75658	0,1098	4,70E-08	0,00278	0,19062	0,1189	9,77E-11						
LR (m)	R	0,29349	0,06803	-0,18456	-0,2349	0,11114	-0,01796	0,13844	0,05614	0,24785	0,34108	1				
	Valor P	0,03125	0,62501	0,18154	0,08731	0,42365	0,89741	0,31812	0,68679	0,07077	0,0116					
CCRc (gon/km)	R	-0,47593	-0,45675	0,39297	0,22174	0,07159	0,05478	-0,37557	0,12939	-0,32614	-0,00439	-0,06544	1			
	Valor P	0,00028	0,00052	0,00329	0,10708	0,60694	0,69399	0,00513	0,35108	0,01609	0,97487	0,63828				
CCRr_c (gon/km)	R	-0,66521	-0,48412	0,80497	0,63072	0,15917	0,21937	-0,44753	0,06312	-0,40365	-0,04551	-0,37177	0,27957	1		
	Valor P	4,09E-08	0,00021	0	3,19E-07	0,2503	0,11098	0,00069	0,65025	0,00247	0,74384	0,00564	0,04062			
CCR (gon/km)	R	-0,78026	-0,47004	0,57228	0,63092	-0,02933	0,02881	-0,44975	0,00173	-0,40557	-0,15726	-0,25053	0,35026	0,63884	1	
	Valor P	3,52E-12	0,00034	6,15E-06	3,15E-07	0,83328	0,83616	0,00064	0,99008	0,00235	0,25611	0,06767	0,00942	2,01E-07		

Este análisis arrojó que el parámetro de la clotoide (ACL) (0,62919), la tasa de cambio de curvatura del tramo (CCR) (-0,60997), el radio (R) (0,59648), el ángulo de deflexión (γ) (-0,59283) y la tasa de cambio de curvatura de la curva (CCR_c) (-0,50534), fueron las variables que mayor correlación presentaron para la velocidad del percentil 85 de camiones cargados.

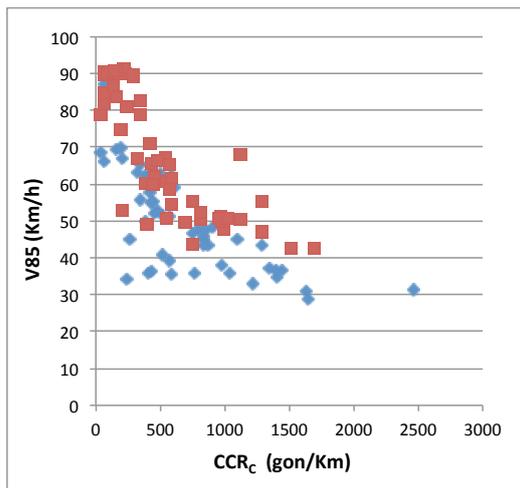
En camiones descargados, las variables que mayor correlación presentaron fueron: la curvatura (Γ) (-0,80706), la tasa de cambio de curvatura del tramo (CCR) (-0,78026), el ángulo de deflexión (γ) (-0,71226), la tasa de cambio de curvatura de la curva (CCR_c) (-0,66521) y el radio (R) (0,56101).

Por el contrario la longitud de la recta anterior (L_R) presentó una correlación muy baja para camiones cargados (0,26391) y descargados (0,29349). La longitud de la curva (L_C) mostró un comportamiento muy diferente para los dos tipos de camiones, de esta forma, en camiones cargados la correlación fue de 0,40851 y en camiones descargados de apenas 0,01667.

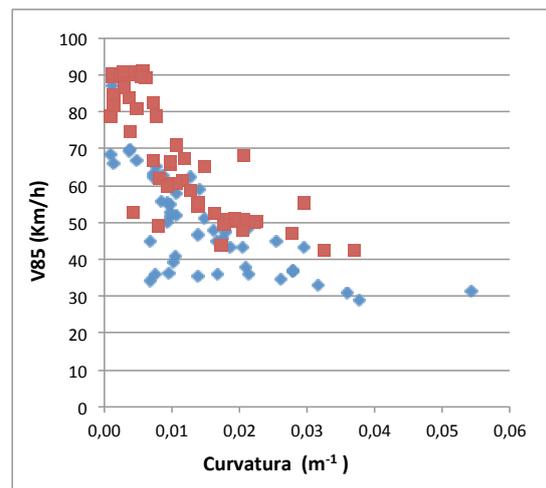
La Figura 6.2 muestra la relación entre estas variables y el percentil 85 de la velocidad para las dos tendencias claramente diferenciadas, que estaban relacionadas con camiones cargados y descargados. Así, la velocidad del percentil 85 para camiones cargados fue menor que para camiones descargados. De esta manera, se llevó a cabo el análisis para 51 curvas con camiones cargados y 54 con camiones descargados.



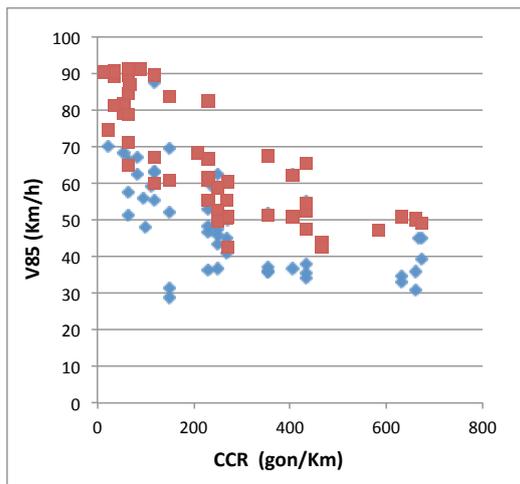
(a)



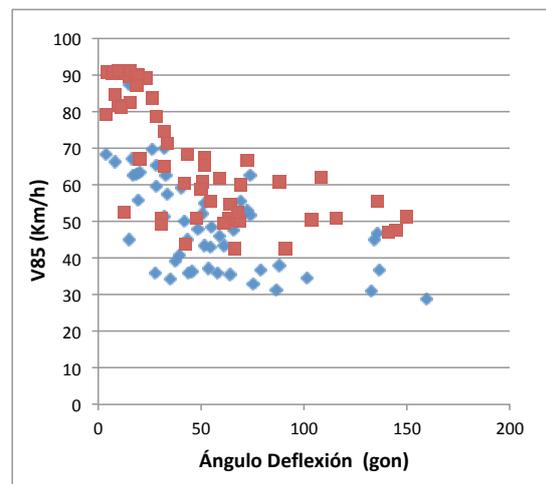
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.2 Velocidad del percentil 85 (V_{85}) vs. las variables geométricas del trazado en planta

La Figura 6.2a muestra cómo la velocidad del percentil 85 desarrollada por los camiones aumenta hasta un cierto radio a partir de cual permanece constante, por lo que su relación no es lineal.

En cuanto al CCR_c (Figura 6.2b), la curvatura (Figura 6.2c), CCR (Figura 6.2d) y el ángulo de deflexión (Figura 6.2d) ocurre el fenómeno inverso que se presenta respecto al radio, es decir, la velocidad del percentil 85 disminuye a medida que estas variables aumentan. De esta manera, ninguna de las variables de la Figura 6.2 presenta una relación lineal con la velocidad del percentil 85.

De igual forma, la Figura 6.2 confirma los resultados obtenidos en la matriz de correlación (Tabla 6.5 y Tabla 6.6), donde las variables con mayor correlación negativa fueron el CCR_c (Figura 6.2b) y la curvatura (Figura 6.2c), ya que estas dos variables muestran una menor dispersión que las demás.

Por otra parte, el análisis de la relación entre el alzado y la velocidad de operación se enfocó en la pendiente longitudinal. Para ello, se estudió la pendiente en diferentes puntos de la curva: en el punto de curvatura, en el punto medio de la curva, en el final de la curva y la pendiente media de la curva (Figura 6.3).

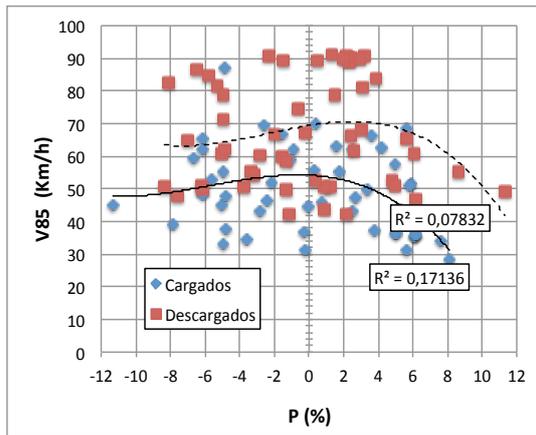
Cabe destacar que la pendiente en el punto de curvatura era la pendiente de la recta precedente. Solo ocho rectas presentaron diferentes pendientes a lo largo de ellas. En este caso, la pendiente longitudinal del tramo final de la recta fue la considerada. Además, ninguna de las 105 curvas estudiadas presentó un acuerdo vertical con pendiente ascendente a la entrada y pendiente descendente a la salida de la curva o viceversa.

La pendiente en el punto de curvatura y en el punto medio de la curva explicaron mejor el fenómeno (Figura 6.3a y Figura 6.3b). En pendientes descendentes, la pendiente longitudinal no era un factor significativo, mientras que en pendientes ascendentes la velocidad de operación de los camiones decrecía desde un cierto valor.

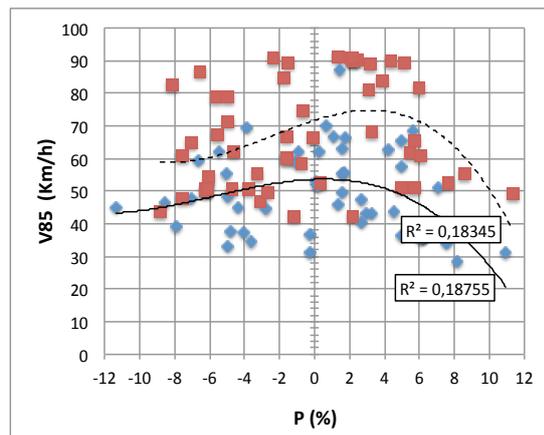
La tendencia asociada con la pendiente al final de la curva fue contraria a la intuición, de manera que la velocidad era mayor a medida que la pendiente aumentaba (Figura 6.3c – camiones descargados).

Por último, cabe destacar que el uso de la pendiente media a lo largo de la curva podría esconder la verdadera influencia de la pendiente en la velocidad de los vehículos pesados (Figura 6.3d).

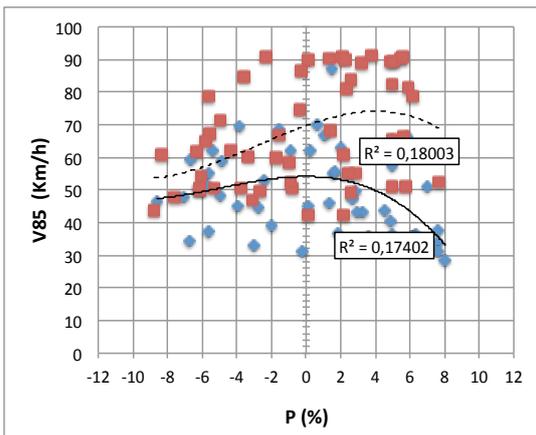
Por lo anterior y teniendo en cuenta que generalmente los camiones adaptan su velocidad antes de llegar al punto medio de la curva (Figura 6.1), la pendiente en el punto de curvatura fue considerada en este estudio como la variable del alzado que influye sobre la velocidad del percentil 85. Además, los conductores alcanzaban la velocidad mínima habitualmente antes de llegar al punto medio de la curva.



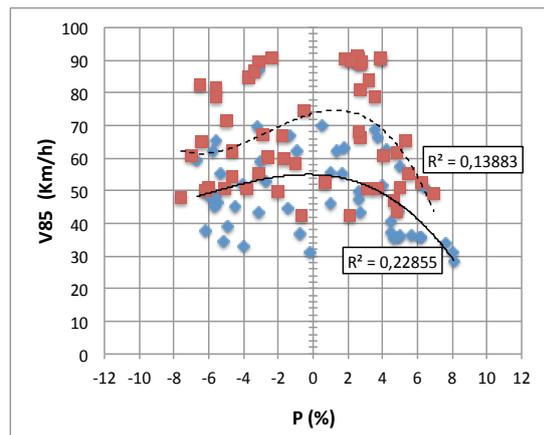
(a) Pendiente en el punto de curvatura



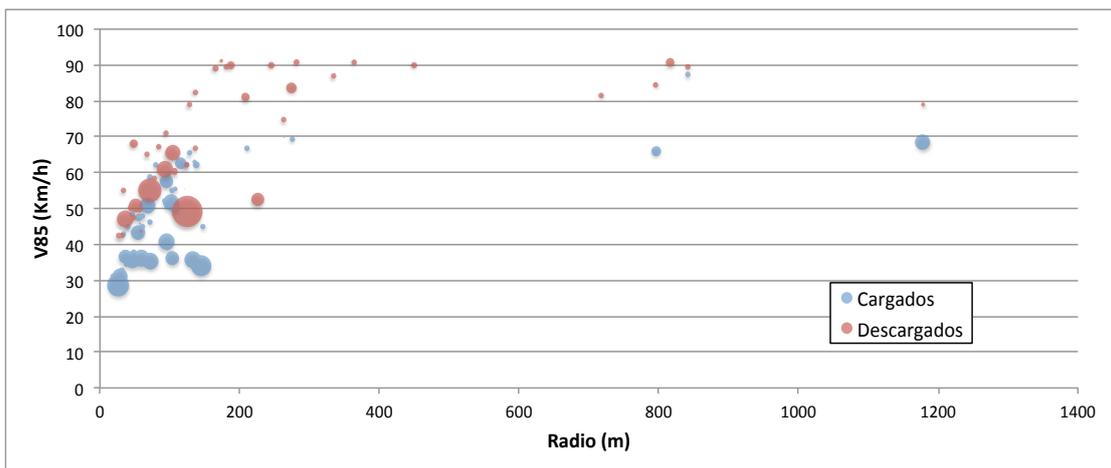
(b) Pendiente en el punto medio de la curva



(c) Pendiente en el punto final de la curva



(d) Pendiente media



(e)

* El tamaño de la burbuja representa el valor de la pendiente en valor absoluto en el punto de curvatura.

Figura 6.3 Velocidad del percentil 85 (V_{85}) vs. la pendiente

Por último, para comprender mejor el comportamiento de los camiones en las curvas se analizó la relación entre el trazado en planta, el alzado y la velocidad del percentil 85 conjuntamente. La Figura 6.3e muestra la relación entre el radio, la pendiente en el punto de curvatura y la velocidad del percentil 85 para camiones cargados y descargados. De esta forma, se puede observar como la

velocidad de operación disminuye para un valor de pendiente mayor para curvas con el mismo radio.

6.1.3 Análisis descriptivo: velocidad media

Para llevar a cabo el análisis de la velocidad media se siguió con el mismo procedimiento de la velocidad del percentil 85. De esta manera, la velocidad media mínima (V_{mmin}) fue identificada para cada curva a partir del perfil de velocidad media de cada tramo.

Posteriormente, un análisis preliminar de correlación se llevó a cabo para identificar qué variables geométricas del trazado en planta e índices de trazado presentaban una mayor influencia sobre la velocidad media (V_m) de camiones cargados.

Tabla 6.7 Matriz de correlación de la velocidad del media: camiones cargados

VARIABLES		Vm (km/h)	R (m)	γ (gon)	Γ (m-1) x1000	LC (m)	LCC (m)	ACL1 (m)	LCL1 (m)	ACL2 (m)	LCL2 (m)	LR (m)	CCRc (gon/km)	CCRr_c (gon/km)	CCR (gon/km)	
Vm (km/h)	R	1														
	Valor P															
R (m)	R	0,57634	1													
	Valor P	9,61E-06														
γ (gon)	R	-0,57076	-0,443	1												
	Valor P	0,00001	0,00113													
Γ (m-1) x1000	R	0,18988	0,04041	-0,14216	1											
	Valor P	0,18203	0,77827	0,31969												
LC (m)	R	0,40843	0,41059	0,15395	-0,04448	1										
	Valor P	0,00293	0,00276	0,28077	0,75664											
LCC (m)	R	0,38718	0,36362	0,23961	-0,07122	0,87423	1									
	Valor P	0,005	0,00872	0,09037	0,61943	0										
ACL1 (m)	R	0,59572	0,75495	-0,37232	0,04702	0,69702	0,49932	1								
	Valor P	3,99E-06	1,55E-10	0,00713	0,74319	1,33E-08	0,00019									
LCL1 (m)	R	0,25653	0,31034	-0,06792	-0,02534	0,69922	0,33935	0,77278	1							
	Valor P	0,0692	0,02667	0,63583	0,85991	1,15E-08	0,01485	3,06E-11								
ACL2 (m)	R	0,60738	0,87437	-0,39276	0,09634	0,58179	0,45356	0,67876	0,34653	1						
	Valor P	2,29E-06	0	0,00436	0,50124	7,55E-06	0,00083	4,40E-08	0,01274							
LCL2 (m)	R	0,19605	0,17565	0,10577	0,05176	0,55501	0,32176	0,19184	0,23869	0,57303	1					
	Valor P	0,16796	0,21762	0,46008	0,71831	0,00002	0,02131	0,17747	0,09164	0,00001						
LR (m)	R	0,28017	0,16157	-0,10572	0,2549	0,19419	0,19045	0,21423	0,14156	0,14555	0,04266	1				
	Valor P	0,04645	0,25734	0,46029	0,07105	0,17212	0,18067	0,13116	0,32173	0,30816	0,7663					
CCRc (gon/km)	R	0,00124	-0,27968	-0,00055	-0,09065	0,00279	0,04315	-0,22911	-0,1305	-0,18376	0,11971	-0,07955	1			
	Valor P	0,99309	0,04685	0,99697	0,52698	0,98447	0,7637	0,10584	0,36138	0,19677	0,40274	0,57897				
CCRr_c (gon/km)	R	-0,49935	-0,39992	0,54945	-0,15465	-0,12154	-0,0975	-0,38505	-0,1727	-0,3751	0,05938	-0,4244	0,21799	1		
	Valor P	0,00019	0,00364	0,00003	0,27854	0,39555	0,4961	0,00527	0,22555	0,00669	0,67892	0,00191	0,12436			
CCR (gon/km)	R	-0,60856	-0,33428	0,3713	-0,14224	-0,15455	-0,11038	-0,33128	-0,16931	-0,324	-0,04694	-0,36753	-0,03866	0,55606	1	
	Valor P	2,16E-06	0,01651	0,00731	0,31941	0,27885	0,44067	0,01756	0,23493	0,02037	0,74361	0,00797	0,78769	0,00002		

Tabla 6.8 Matriz de correlación de la velocidad del media: camiones descargados

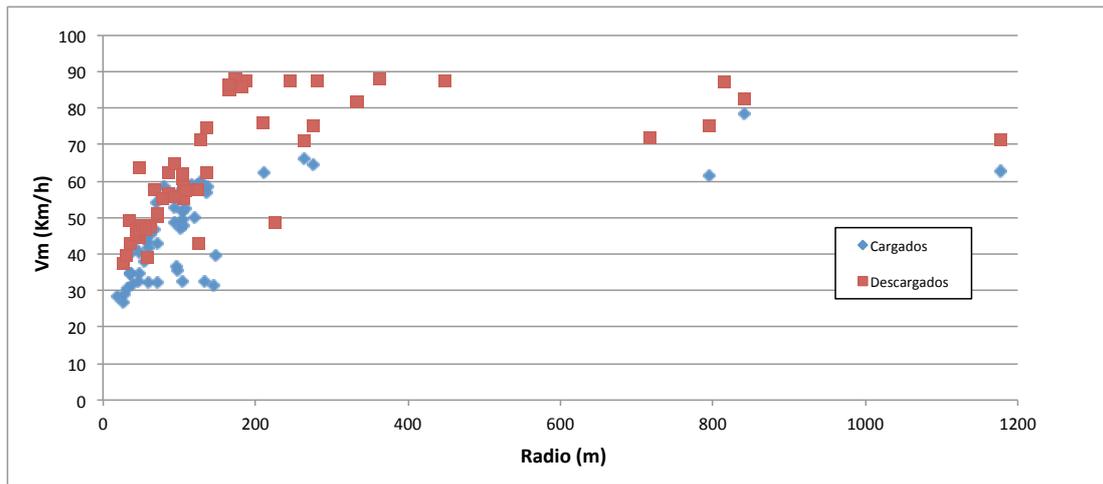
VARIABLES		Vm (km/h)	R (m)	γ (gon)	Γ (m-1) x1000	LC (m)	LCC (m)	ACL1 (m)	LCL1 (m)	ACL2 (m)	LCL2 (m)	LR (m)	CCRc (gon/km)	CCRr_c (gon/km)	CCR (gon/km)	
Vm (km/h)	R	1														
	Valor P															
R (m)	R	0,54982	1													
	Valor P	0,00002														
γ (gon)	R	-0,69352	-0,52664	1												
	Valor P	6,13E-09	0,00004													
Γ (m-1) x1000	R	-0,7939	-0,62632	0,66477	1											
	Valor P	0	4,07E-07	4,20E-08												
LC (m)	R	-0,00308	0,23492	0,36986	-0,24886	1										
	Valor P	0,98236	0,08728	0,00591	0,06959											
LCC (m)	R	-0,01355	0,20153	0,42259	-0,19996	0,9117	1									
	Valor P	0,92254	0,14393	0,00146	0,14715	0										
ACL1 (m)	R	0,53234	0,87338	-0,44244	-0,65514	0,39825	0,28	1								
	Valor P	0,00003	0	0,00081	7,65E-08	0,00286	0,0403									
LCL1 (m)	R	-0,01415	0,13709	0,20324	-0,13384	0,5125	0,25526	0,53517	1							
	Valor P	0,91909	0,32289	0,14049	0,33463	0,00007	0,06248	0,00003								
ACL2 (m)	R	0,44506	0,68749	-0,37898	-0,58113	0,5548	0,38609	0,61888	0,14862	1						
	Valor P	0,00075	9,35E-09	0,00471	4,08E-06	0,00001	0,00393	6,10E-07	0,28348							
LCL2 (m)	R	0,03219	0,17047	0,04317	-0,22008	0,663	0,39924	0,18086	0,21475	0,74579	1					
	Valor P	0,81728	0,2178	0,75658	0,1098	4,70E-08	0,00278	0,19062	0,1189	9,77E-11						
LR (m)	R	0,27095	0,06803	-0,18456	-0,2349	0,11114	-0,01796	0,13844	0,05614	0,24785	0,34108	1				
	Valor P	0,04751	0,62501	0,18154	0,08731	0,42365	0,89741	0,31812	0,68679	0,07077	0,0116					
CCRc (gon/km)	R	-0,45927	-0,45675	0,39297	0,22174	0,07159	0,05478	-0,37557	0,12939	-0,32614	-0,00439	-0,06544	1			
	Valor P	0,00048	0,00052	0,00329	0,10708	0,60694	0,69399	0,00513	0,35108	0,01609	0,97487	0,63828				
CCRr_c (gon/km)	R	-0,65084	-0,48412	0,80497	0,63072	0,15917	0,21937	-0,44753	0,06312	-0,40365	-0,04551	-0,37177	0,27957	1		
	Valor P	9,93E-08	0,00021	0	3,19E-07	0,2503	0,11098	0,00069	0,65025	0,00247	0,74384	0,00564	0,04062			

Este análisis encontró para la velocidad media, correlaciones muy similares a las de la velocidad del percentil 85 para camiones cargados y descargados.

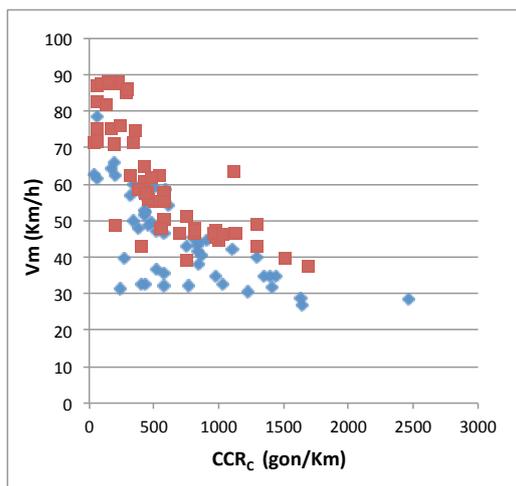
En camiones cargados, las variables que mayor correlación presentaron fueron: la tasa de cambio de curvatura del tramo (CCR) (-0,60856), el parámetro de la clotoide (ACL) (0,60738), el radio (R) (0,57634), el ángulo de deflexión (γ) (-0,57076) y la tasa de cambio de curvatura de la curva (CCR_c) (-0,49935).

En camiones descargados, las variables que mayor correlación presentaron fueron la curvatura (Γ) (-0,7939), la tasa de cambio de curvatura del tramo (CCR) (-0,77986), el ángulo de deflexión (γ) (-0,69352), la tasa de cambio de curvatura de la curva (CCR_c) (-0,65084) y el radio (R) (0,54982).

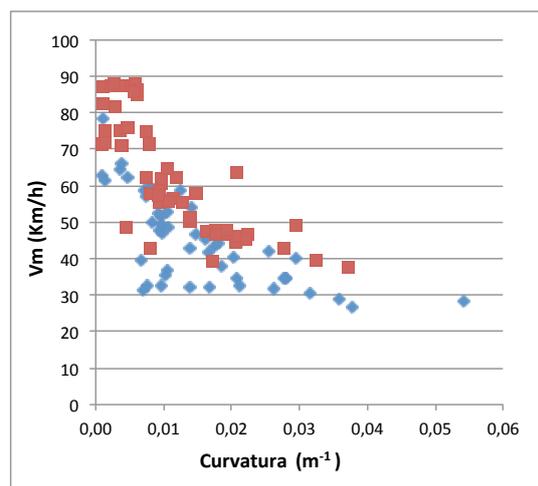
La Figura 6.4 muestra estas variables versus la velocidad media.



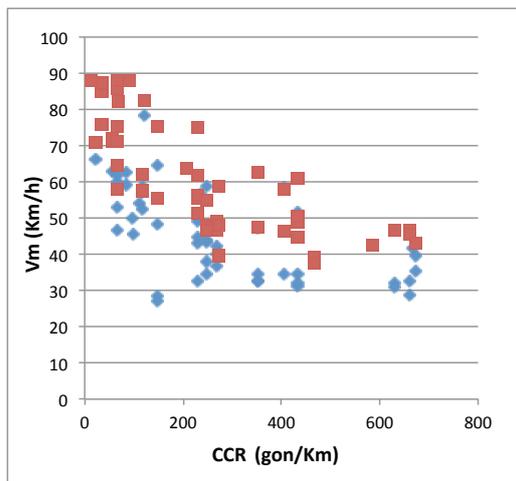
(a)



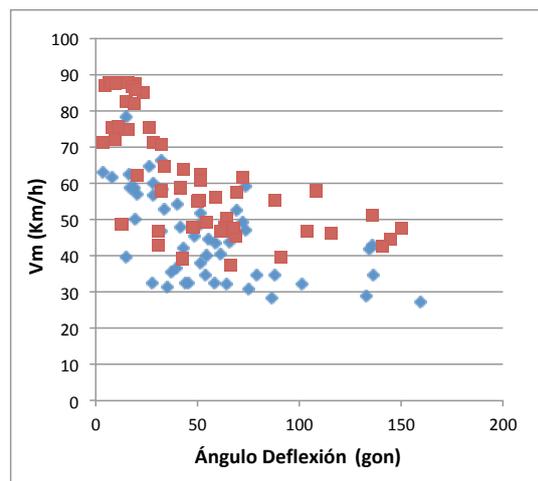
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.4 Velocidad media (V_m) vs. las variables geométricas del trazado en planta

Durante el análisis, al igual que con la velocidad del percentil 85, se identificaron dos tendencias claramente diferenciadas, que estaban

relacionadas con camiones cargados y descargados. Así, la velocidad media para camiones cargados fue menor que para camiones descargados

Asimismo, al igual que con la velocidad del percentil 85 el análisis de la relación entre el alzado y la velocidad de media se enfocó en la pendiente longitudinal (Figura 6.5).

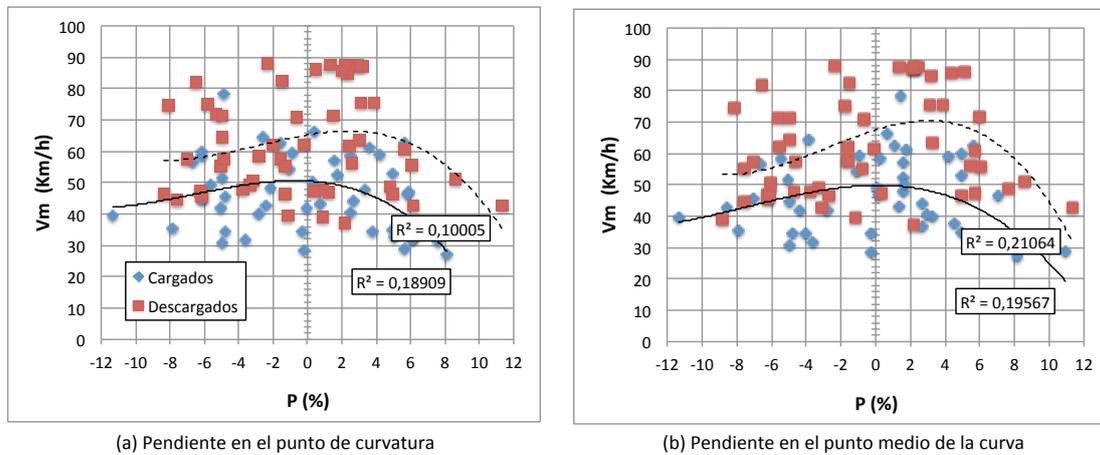


Figura 6.5 Velocidad media (V_m) vs. la pendiente

Durante el análisis, se encontró la misma tendencia de la velocidad del percentil 85, de esta manera, la pendiente en el punto de curvatura fue considerada en este estudio como la variable del alzado que influye sobre la velocidad media.

6.1.4 Análisis descriptivo: velocidad del percentil 15

Para llevar a cabo el análisis de la velocidad del percentil 15, se siguió el mismo procedimiento de la velocidad del percentil 85 y la velocidad media. De esta manera la velocidad del percentil 15 mínima (V_{15min}) fue identificada para cada curva a partir del perfil de velocidad del percentil 15 de cada tramo.

Posteriormente, un análisis preliminar de correlación se llevó a cabo para identificar cuales variable geométricas del trazado en planta e índices de trazado presentaban una mayor influencia sobre la velocidad del percentil 15 (V_{15}) de camiones cargados y descargados (Tabla 6.9 y Tabla 6.10).

Este análisis encontró para la velocidad del percentil 15, correlaciones muy similares a las de la velocidad del percentil 85 y velocidad media para camiones cargados y descargados.

En camiones cargados, las variables que mayor correlación presentaron fueron: la tasa de cambio de curvatura del tramo (CCR) (-0,62559), el parámetro de la clotoide (ACL) (0,57022), el ángulo de deflexión (γ) (-0,5547),

el radio (R) (0,54551) y la tasa de cambio de curvatura de la curva (CCR_c) (-0,51234).

En camiones descargados, las variables que mayor correlación presentaron fueron: la curvatura (Γ) (-0,77657), la tasa de cambio de curvatura del tramo (CCR) (-0,77528), el ángulo de deflexión (γ) (-0,67364), la tasa de cambio de curvatura de la curva (CCR_c) (-0,63225) y el radio (R) (0,51628).

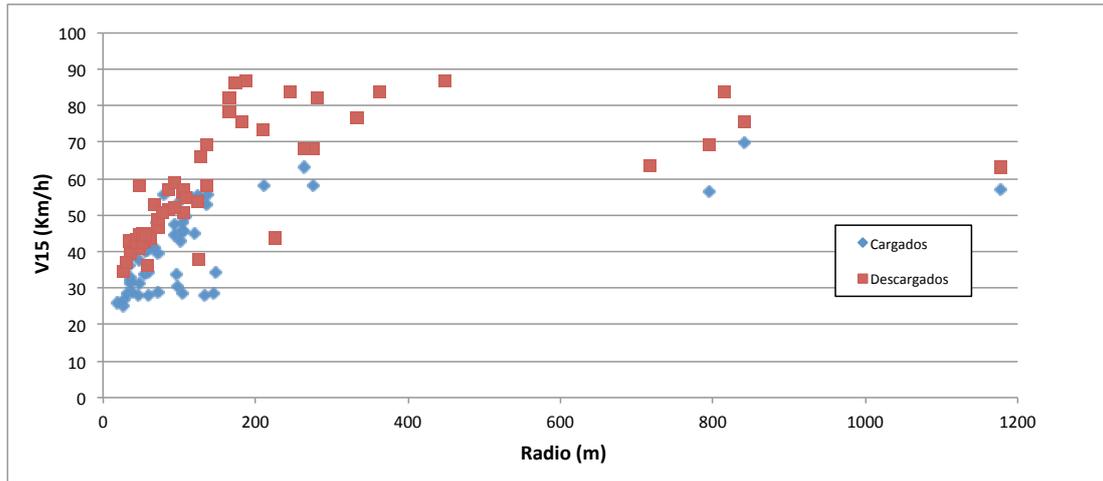
La Figura 6.6 muestra estas variables versus la velocidad media.

Tabla 6.9 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 15: camiones cargados

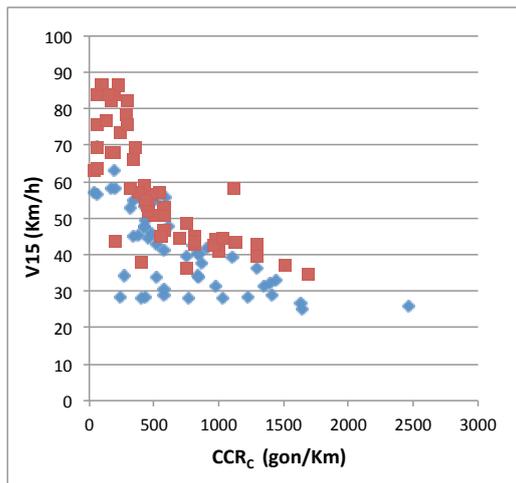
VARIABLES		V15 (km/h)	R (m)	γ (gon)	Γ (m-1) x1000	LC (m)	LCC (m)	ACL1 (m)	LCL1 (m)	ACL2 (m)	LCL2 (m)	LR (m)	CCRc (gon/km)	CCRr_c (gon/km)	CCR (gon/km)	
V15 (km/h)	R	1														
	Valor P															
R (m)	R	0,54551	1													
	Valor P	0,00003														
γ (gon)	R	-0,5547	-0,443	1												
	Valor P	0,00002	0,00113													
Γ (m-1) x1000	R	0,19449	0,04041	-0,14216	1											
	Valor P	0,17144	0,77827	0,31969												
LC (m)	R	0,38831	0,41059	0,15395	-0,04448	1										
	Valor P	0,00487	0,00276	0,28077	0,75664											
LCC (m)	R	0,36872	0,36362	0,23961	-0,07122	0,87423	1									
	Valor P	0,00776	0,00872	0,09037	0,61943	0										
ACL1 (m)	R	0,57022	0,75495	-0,37232	0,04702	0,69702	0,49932	1								
	Valor P	0,00001	1,55E-10	0,00713	0,74319	1,33E-08	0,00019									
LCL1 (m)	R	0,25177	0,31034	-0,06792	-0,02534	0,69922	0,33935	0,77278	1							
	Valor P	0,07471	0,02667	0,63583	0,85991	1,15E-08	0,01485	3,06E-11								
ACL2 (m)	R	0,57006	0,87437	-0,39276	0,09634	0,58179	0,45356	0,67876	0,34653	1						
	Valor P	0,00001	0	0,00436	0,50124	7,55E-06	0,00083	4,40E-08	0,01274							
LCL2 (m)	R	0,17129	0,17565	0,10577	0,05176	0,55501	0,32176	0,19184	0,23869	0,57303	1					
	Valor P	0,22943	0,21762	0,46008	0,71831	0,00002	0,02131	0,17747	0,09164	0,00001						
LR (m)	R	0,30676	0,16157	-0,10572	0,2549	0,19419	0,19045	0,21423	0,14156	0,14555	0,04266	1				
	Valor P	0,02856	0,25734	0,46029	0,07105	0,17212	0,18067	0,13116	0,32173	0,30816	0,7663					
CCRc (gon/km)	R	-0,00879	-0,27968	-0,00055	-0,09065	0,00279	0,04315	-0,22911	-0,1305	-0,18376	0,11971	-0,07955	1			
	Valor P	0,95119	0,04685	0,99697	0,52698	0,98447	0,7637	0,10584	0,36138	0,19677	0,40274	0,57897				
CCRr_c (gon/km)	R	-0,51234	-0,39992	0,54945	-0,15465	-0,12154	-0,0975	-0,38505	-0,1727	-0,3751	0,05938	-0,4244	0,21799	1		
	Valor P	0,00012	0,00364	0,00003	0,27854	0,39555	0,4961	0,00527	0,22555	0,00669	0,67892	0,00191	0,12436			
CCR (gon/km)	R	-0,62559	-0,33428	0,3713	-0,14224	-0,15455	-0,11038	-0,33128	-0,16931	-0,324	-0,04694	-0,36753	-0,03866	0,55606	1	
	Valor P	9,18E-07	0,01651	0,00731	0,31941	0,27885	0,44067	0,01756	0,23493	0,02037	0,74361	0,00797	0,78769	0,00002		

Tabla 6.10 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 15: camiones descargados

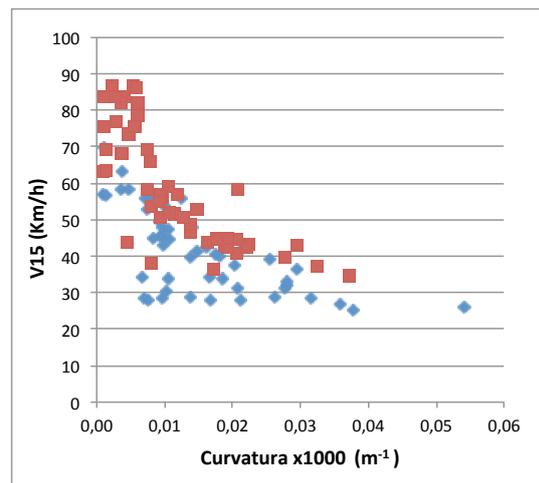
VARIABLES		V15 (km/h)	R (m)	γ (gon)	Γ (m-1) x1000	LC (m)	LCC (m)	ACL1 (m)	LCL1 (m)	ACL2 (m)	LCL2 (m)	LR (m)	CCRc (gon/km)	CCRr_c (gon/km)	CCR (gon/km)	
V15 (km/h)	R	1														
	Valor P															
R (m)	R	0,51608	1													
	Valor P	0,00006														
γ (gon)	R	-0,67364	-0,52664	1												
	Valor P	2,37E-08	0,00004													
Γ (m-1) x1000	R	-0,77657	-0,62632	0,66477	1											
	Valor P	5,17E-12	4,07E-07	4,20E-08												
LC (m)	R	-0,01718	0,23492	0,36986	-0,24886	1										
	Valor P	0,90186	0,08728	0,00591	0,06959											
LCC (m)	R	-0,03164	0,20153	0,42259	-0,19996	0,9117	1									
	Valor P	0,82033	0,14393	0,00146	0,14715	0										
ACL1 (m)	R	0,50617	0,87338	-0,44244	-0,65514	0,39825	0,28	1								
	Valor P	0,00009	0	0,00081	7,65E-08	0,00286	0,0403									
LCL1 (m)	R	-0,00222	0,13709	0,20324	-0,13384	0,5125	0,25526	0,53517	1							
	Valor P	0,98729	0,32289	0,14049	0,33463	0,00007	0,06248	0,00003								
ACL2 (m)	R	0,41387	0,68749	-0,37898	-0,58113	0,5548	0,38609	0,61888	0,14862	1						
	Valor P	0,00186	9,35E-09	0,00471	4,08E-06	0,00001	0,00393	6,10E-07	0,28348							
LCL2 (m)	R	0,01898	0,17047	0,04317	-0,22008	0,663	0,39924	0,18086	0,21475	0,74579	1					
	Valor P	0,89167	0,2178	0,75658	0,1098	4,70E-08	0,00278	0,19062	0,1189	9,77E-11						
LR (m)	R	0,25727	0,06803	-0,18456	-0,2349	0,11114	-0,01796	0,13844	0,05614	0,24785	0,34108	1				
	Valor P	0,06037	0,62501	0,18154	0,08731	0,42365	0,89741	0,31812	0,68679	0,07077	0,0116					
CCRc (gon/km)	R	-0,44789	-0,45675	0,39297	0,22174	0,07159	0,05478	-0,37557	0,12939	-0,32614	-0,00439	-0,06544	1			
	Valor P	0,00068	0,00052	0,00329	0,10708	0,60694	0,69399	0,00513	0,35108	0,01609	0,97487	0,63828				
CCRr_c (gon/km)	R	-0,63225	-0,48412	0,80497	0,63072	0,15917	0,21937	-0,44753	0,06312	-0,40365	-0,04551	-0,37177	0,27957	1		
	Valor P	2,93E-07	0,00021	0	3,19E-07	0,2503	0,11098	0,00069	0,65025	0,00247	0,74384	0,00564	0,04062			
CCR (gon/km)	R	-0,77528	-0,47004	0,57228	0,63092	-0,02933	0,02881	-0,44975	0,00173	-0,40557	-0,15726	-0,25053	0,35026	0,63884	1	
	Valor P	5,90E-12	0,00034	6,15E-06	3,15E-07	0,83328	0,83616	0,00064	0,99008	0,00235	0,25611	0,06767	0,00942	2,01E-07		



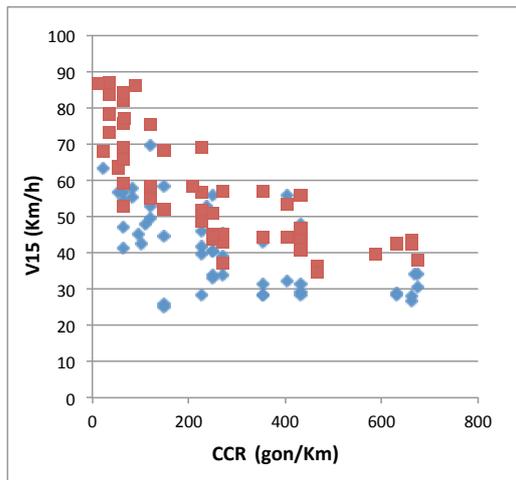
(a)



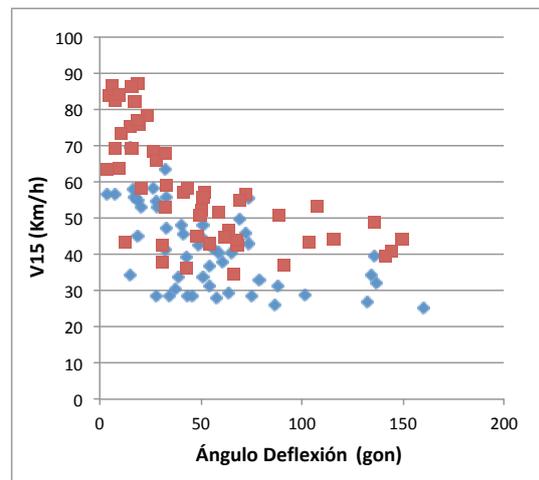
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.6 Velocidad del percentil 15 (V_{15}) vs. las variables geométricas del trazado en planta

Durante el análisis, al igual que con la velocidad del percentil 85 y la velocidad media, se identificaron dos tendencias claramente diferenciadas, que estaban relacionadas con camiones cargados y descargados.

Asimismo, al igual que con la velocidad del percentil 85 y la velocidad media el análisis de la relación entre el alzado y la velocidad del percentil 15 se enfocó en la pendiente longitudinal (Figura 6.7).

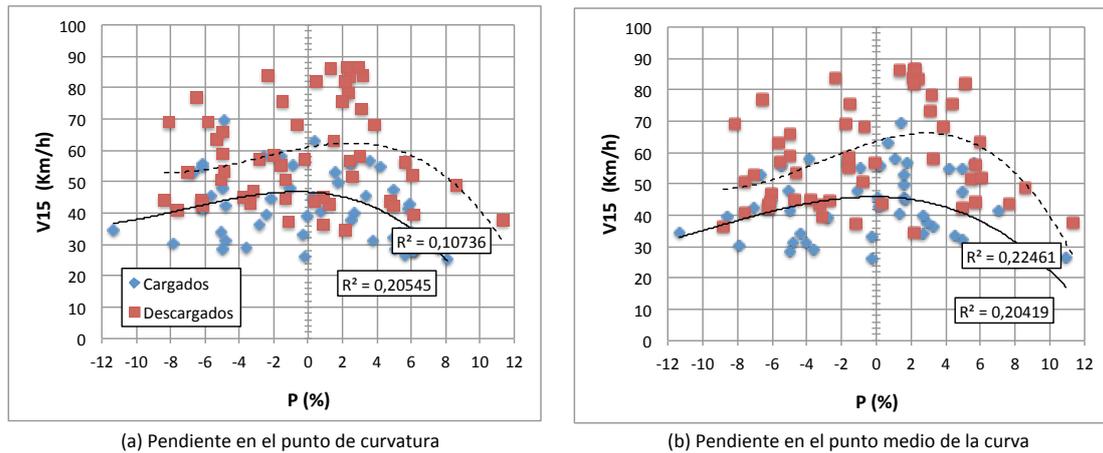


Figura 6.7 Velocidad del percentil 15 (V_{15}) vs. la pendiente

Durante el análisis, se encontró la misma tendencia de la velocidad del percentil 85 y la velocidad media, de esta manera, la pendiente en el punto de curvatura fue considerada en este estudio como la variable del alzado que influye sobre la velocidad del percentil 15.

6.2 ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN RECTAS

La estimación de las velocidades de operación en rectas es más compleja y menos precisa que en curvas debido, fundamentalmente, a que no hay una aceleración lateral que compensar, y por tanto, el riesgo de salirse de la carretera no entra dentro de la elección de la velocidad por parte de los conductores.

Lo anterior hace que esta elección de la velocidad se base en otros criterios, como puede ser la sección transversal, el entorno de la vía, el tráfico existente, o la geometría general del tramo. Además, al no estar estos criterios tan relacionados con la posibilidad de sufrir un accidente, son interpretados por los conductores de formas muy diversas, lo que conlleva habitualmente a que la dispersión de las velocidades en rectas sea mayor que en curvas, además de que su valor promedio también es superior.

En este estudio, al disponer de datos continuos de velocidad individuales para cada uno de los conductores, las velocidades de operación que fueron utilizadas para llevar a cabo el análisis y para la calibración de los modelos fue la velocidad máxima que se mantuvo constante, sin influencia de aceleración o

deceleración alguna, independientemente de si se situaba en el centro de la recta o no.

6.2.1 Análisis del tamaño de muestra en rectas

El número de conductores requeridos para cada recta también fue analizado. Para ello, se utilizó la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z^2 \cdot \sigma^2}{e^2} \quad (4)$$

Donde:

n = número de conductores requeridos

Z = constante dependiente del nivel de confianza que se obtiene de la tabla de distribución normal, en este caso 1,96 para un nivel de confianza del 95%

σ = desviación típica de la velocidad (km/h)

e = error asumido (2 km/h)

En la Tabla 6.11 se presenta el número de vehículos necesario para las 59 rectas seleccionadas.

Tabla 6.11 Tamaño de la muestra necesaria para las rectas

Recta	Desviación típica	Muestra real	Muestra necesaria
R01I05	1,993567	130	2
R01I07	0,458787	128	1
R01V05	1,922971	99	2
R01V07	2,499168	101	3
R02I02	0,508534	130	1
R02I03	1,792812	129	2
R02I04	2,711073	111	4
R02V02	0,992436	95	1
R02V04	2,785198	88	4
R05I03	0,343504	115	1
R05I05	1,088325	128	1
R05I06	4,307465	127	10
R05I07	3,864659	129	8
R05I08	2,594141	129	4
R05I10	1,910234	128	2
R05I13	1,070474	129	1
R05I16	1,991128	129	2
R05I17	2,337865	129	3
R05I20	0,494605	128	1
R05I21	0,340858	128	1
R05I22	0,136267	128	1
R05I32	1,366388	130	1

R05I35	0,549538	129	1
R05I36	0,649133	130	1
R05I37	0,286916	130	1
R05I38	0,847956	127	1
R05I39	0,611976	135	1
R05I41	0,628495	127	1
R05V03	1,301918	126	1
R05V05	1,502537	125	1
R05V06	4,721742	125	12
R05V07	0,980998	126	1
R05V08	3,859116	125	8
R05V10	13,218064	125	93
R05V13	2,147873	125	2
R05V16	14,202762	122	107
R05V17	0,828506	124	1
R05V21	1,232927	125	1
R05V28	2,993830	125	5
R05V36	1,771046	123	2
R05V38	3,448961	123	6
R05V39	1,990498	122	2
R05V43	2,485641	124	3
R06V01	2,884222	74	4
R07I01	1,582242	131	1
R07I06	0,545596	131	1
R07I07	1,679711	132	2
R07V01	2,096806	125	2
R07V07	2,338363	126	3
R15I16	4,788560	25	12
R15I23	5,450214	24	16
R15I24	2,505971	25	3
R15V16	0,871786	24	1
R15V24	7,546269	24	30
R16I06	2,362574	23	3
R16V06	2,678918	24	4
R18I14	2,729803	15	4
R18V06	6,513733	14	23
R18V14	1,270095	14	1

El resultado arrojó que el número de conductores requeridos en la mayoría de las rectas seleccionadas fue menor a 20, esto se puede explicar debido a la baja desviación típica de la velocidad. Así, la media de la desviación típica de la velocidad fue de 1,65 km/h. No obstante, la media del número de observaciones fue aproximadamente de 90 conductores por recta.

6.2.2 Análisis descriptivo: velocidad del percentil 85

El análisis de la relación entre la velocidad del percentil 85 en rectas y las variables se llevó a cabo a través de la velocidad máxima del percentil 85

observada a lo largo de cada recta de estudio, que fue identificada para cada recta a partir de los perfiles de velocidad del percentil 85 de cada tramo.

Posteriormente y teniendo en cuenta la tendencia diferenciada que se identificó para camiones cargados y descargados (Figura 5.10), un análisis preliminar de correlación se llevó a cabo por separado para 33 rectas con camiones cargados (Tabla 6.12) y 26 rectas con camiones descargados (Tabla 6.13), para identificar cuales variables presentaban una mayor influencia sobre la velocidad del percentil 85 (V_{85}) en rectas.

Tabla 6.12 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 85: camiones cargados

VARIABLES		V85 (km/h)	LR (m)	V85mcp (Km/h)	RC1 (m)	LC1 (m)	γ C1 (gon)	RC2 (m)	LC2 (m)	γ C2 (gon)	CCRc_r_c (gon/km)	CCRc_r (gon/km)	CCRc (gon/km)	CCR (gon/km)
V85 (km/h)	R	1												
	Valor P													
LR (m)	R	0,79797	1											
	Valor P	2,67E-08												
V85mcp (km/h)	R	0,93587	0,75979	1										
	Valor P	0	2,93E-07											
RC1 (m)	R	0,36497	0,42706	0,40381	1									
	Valor P	0,03676	0,01319	0,01978										
LC1 (m)	R	0,23161	0,25891	0,21869	0,11319	1								
	Valor P	0,19467	0,1457	0,22145	0,53054									
γ C1 (gon)	R	-0,34352	-0,30283	-0,3491	-0,48581	0,59974	1							
	Valor P	0,05031	0,0867	0,04646	0,00416	0,00023								
RC2 (m)	R	0,30502	0,21516	0,33563	0,08456	0,08198	-0,12608	1						
	Valor P	0,08434	0,22918	0,05619	0,63988	0,65017	0,48445							
LC2 (m)	R	0,28419	0,24443	0,24513	0,16205	0,48049	0,22034	-0,02653	1					
	Valor P	0,10896	0,17041	0,16914	0,36759	0,00465	0,21789	0,88347						
γ C2 (gon)	R	-0,18408	-0,09854	-0,27236	0,0885	0,04026	0,07335	-0,58694	0,51591	1				
	Valor P	0,30513	0,58536	0,12517	0,62431	0,82394	0,68497	0,00033	0,00212					
CCRc_r_c (gon/km)	R	-0,77411	-0,6365	-0,71355	-0,38114	-0,17199	0,47303	-0,45562	-0,16094	0,39016	1			
	Valor P	1,26E-07	0,00007	3,14E-06	0,02864	0,33854	0,00543	0,00771	0,37092	0,02479				
CCRc_r (gon/km)	R	-0,63966	-0,52051	-0,56788	-0,53049	0,10468	0,75757	-0,17501	-0,11225	0,04509	0,83463	1		
	Valor P	0,00006	0,0019	0,00057	0,00149	0,5621	3,32E-07	0,32999	0,53399	0,80321	1,57E-09			
CCRc (gon/km)	R	-0,60991	-0,48451	-0,62251	-0,74844	-0,27542	0,50567	-0,3092	-0,18961	0,17117	0,76336	0,74225	1	
	Valor P	0,00016	0,00427	0,00011	5,49E-07	0,12082	0,00268	0,07995	0,29057	0,34087	2,39E-07	7,64E-07		
CCR (gon/km)	R	-0,63031	-0,49392	-0,61146	-0,22411	-0,40607	-0,02182	-0,28892	-0,27462	0,25665	0,66066	0,37063	0,49701	1
	Valor P	0,00008	0,00349	0,00016	0,20992	0,01904	0,90404	0,10295	0,12195	0,14936	0,00003	0,03373	0,00326	

Tabla 6.13 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 85: camiones descargados

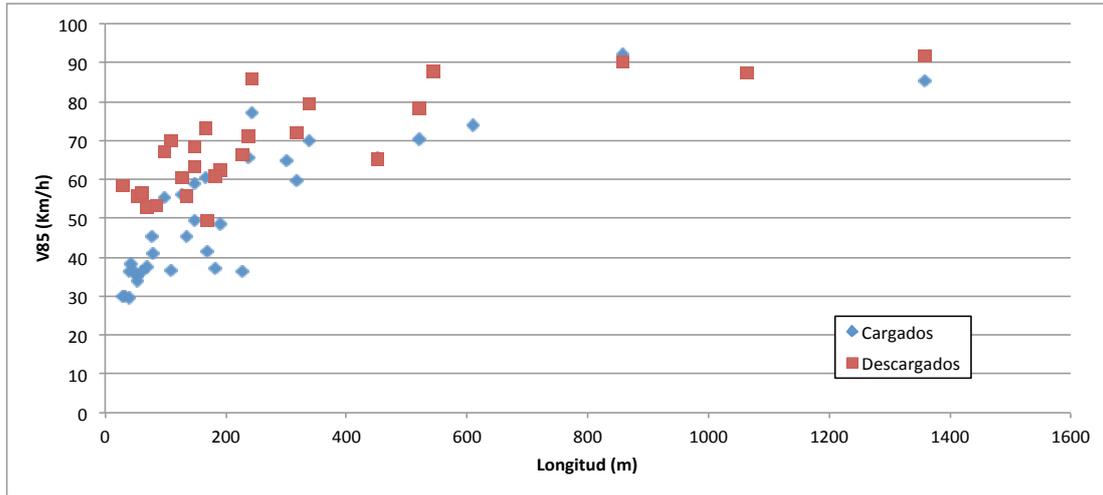
VARIABLES		V85 (km/h)	LR (m)	V85mcp (Km/h)	RC1 (m)	LC1 (m)	γ C1 (gon)	RC2 (m)	LC2 (m)	γ C2 (gon)	CCRc_r_c (gon/km)	CCRc_r (gon/km)	CCRc (gon/km)	CCR (gon/km)
V85 (km/h)	R	1												
	Valor P													
LR (m)	R	0,78237	1											
	Valor P	2,81E-06												
V85mcp (km/h)	R	0,76943	0,37588	1										
	Valor P	6,94E-06	0,06406											
RC1 (m)	R	0,38691	0,19571	0,51412	1									
	Valor P	0,05604	0,34846	0,00856										
LC1 (m)	R	0,40302	0,23119	0,2431	0,04516	1								
	Valor P	0,04576	0,26617	0,24162	0,83027									
γ C1 (gon)	R	-0,25028	-0,02916	-0,47442	-0,63512	0,45521	1							
	Valor P	0,22756	0,88996	0,01657	0,00065	0,02223								
RC2 (m)	R	0,74456	0,68099	0,41642	0,07384	0,08	-0,19771	1						
	Valor P	0,00002	0,00018	0,03839	0,72577	0,70385	0,34346							
LC2 (m)	R	0,20443	0,16592	0,10665	-0,08533	0,40254	0,16412	0,21428	1					
	Valor P	0,32697	0,428	0,61189	0,68507	0,04605	0,43307	0,3037						
γ C2 (gon)	R	-0,4163	-0,38722	-0,21366	-0,2306	0,2025	0,2345	-0,53377	0,61139	1				
	Valor P	0,03846	0,05583	0,30511	0,26742	0,33166	0,2592	0,00599	0,00117					
CCRc_r_c (gon/km)	R	-0,83113	-0,62981	-0,51967	-0,44349	-0,13392	0,38406	-0,68449	0,0773	0,70209	1			
	Valor P	2,67E-07	0,00074	0,00776	0,02638	0,52333	0,05804	0,00016	0,71343	0,00009				
CCRc_r (gon/km)	R	-0,7521	-0,53167	-0,51813	-0,59237	-0,06649	0,58351	-0,53368	-0,04698	0,44813	0,90104	1		
	Valor P	0,00001	0,00623	0,00797	0,00181	0,75219	0,0022	0,006	0,82353	0,02467	8,20E-10			
CCRc (gon/km)	R	-0,57192	-0,18233	-0,65311	-0,663	-0,28332	0,65462	-0,30439	-0,16728	0,1062	0,50705	0,68096	1	
	Valor P	0,00282	0,38304	0,0004	0,0003	0,16994	0,00038	0,13904	0,42415	0,61338	0,00968	0,00018		
CCR (gon/km)	R	-0,67754	-0,50633	-0,52043	-0,29195	-0,27548	0,15975	-0,50854	-0,24627	0,24997	0,61082	0,53681	0,34512	1
	Valor P	0,0002	0,0098	0,00765	0,15675	0,18259	0,44559	0,00944	0,23535	0,22816	0,00118	0,00566	0,0911	

Como resultado del análisis de correlación, la V_{85} mínima de la curva precedente, la longitud de la recta, la tasa de cambio de curvatura del tramo (CCR) y la tasa de cambio de curvatura de la curva precedente-recta-curva posterior ($CCR_{c_r_c}$) presentaron una alta correlación con la velocidad del percentil 85 en rectas. Por el contrario, la longitud de la curva (L_C) y el ángulo de deflexión de la curva precedente (γ) y posterior presentaron una correlación muy baja (menor a 0,3).

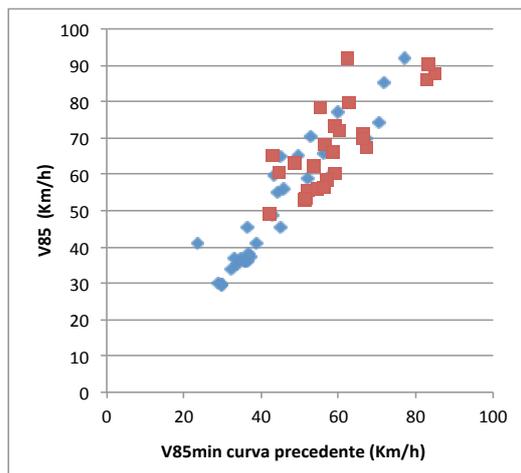
Específicamente, en los camiones cargados las variables con mayor coeficiente de correlación positiva fueron la V_{85} mínima de la curva precedente (0,9359) y la longitud de la recta (0,7980), mientras que las variables con mayor coeficiente de correlación negativa fueron el $CCR_{c_r_c}$ (0,7741) y el CCR (0,6303).

En camiones descargados las variables con mayor coeficiente de correlación positiva fueron la longitud de la recta (0,7824) y la V_{85} mínima de la curva precedente (0,7694), mientras las variables con mayor coeficiente de correlación negativa fueron el $CCR_{c_r_c}$ (0,8311) y el CCR_{c_r} (0,7521).

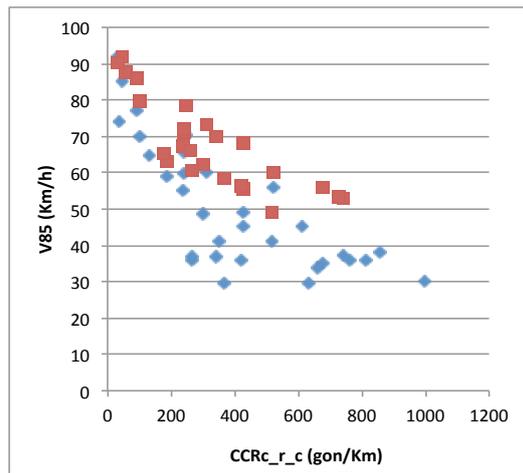
La Figura 6.8 muestra estas variables versus la velocidad de operación, para camiones cargados y descargados.



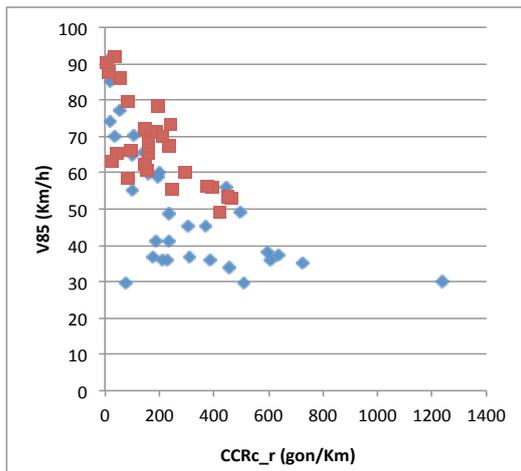
(a)



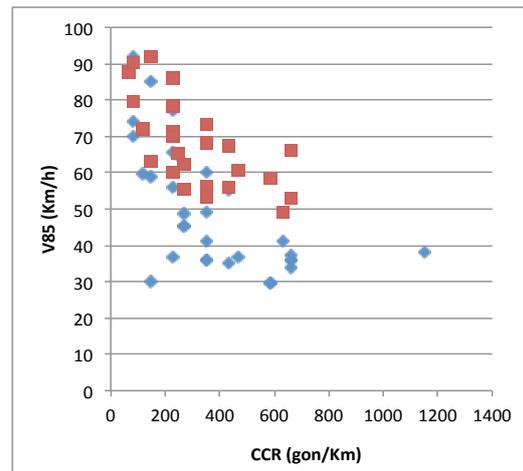
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.8 Velocidad del percentil 85 (V_{85}) vs. las variables geométricas del trazado en planta

La Figura 6.8a muestra como la velocidad de operación en flujo libre desarrollada por los camiones aumenta hasta una cierta longitud de la recta, a partir de cual permanece constante, por lo cual su relación no es lineal.

La V_{85} de la curva precedente presentó una relación lineal con la V_{85} en la recta. Entre todas las variables analizadas, su representación gráfica muestra muy poca dispersión de los datos especialmente en los camiones descargados (Figura 6.8b).

Las variables relacionadas con el $CCR_{c_r_c}$, el CCR_{c_r} y el CCR (Figura 6.8c, Figura 6.8d y Figura 6.8e respectivamente) presentan una tendencia decreciente con la velocidad del percentil 85, pero los datos muestran una mayor dispersión que considerando la longitud de la recta o la velocidad de operación (V_{85}) de la curva precedente.

Por otra parte, el análisis de la relación entre el alzado y la velocidad del percentil 85 se centró en la pendiente longitudinal de la recta. 30 rectas presentaron diferentes pendientes a lo largo de ellas. En este caso, la pendiente longitudinal ponderada de la recta fue la considerada (Figura 6.9). Cabe destacar que ninguna de las 59 rectas estudiadas presentaron acuerdo vertical con pendiente ascendente en la entrada y pendiente descendente en la salida o viceversa.

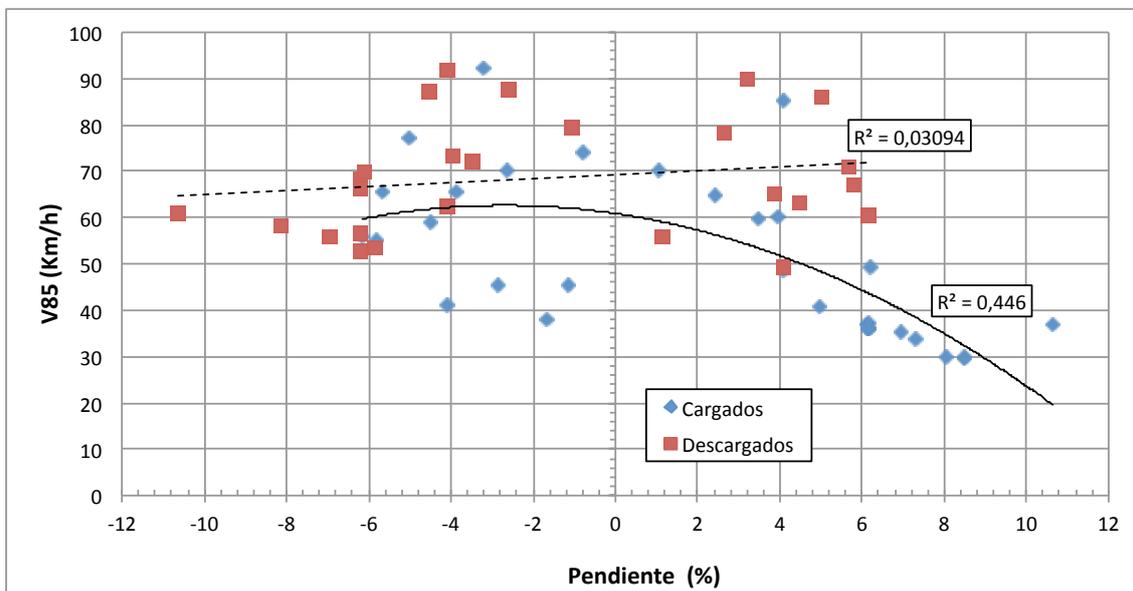


Figura 6.9 Velocidad del percentil 85 (V_{85}) vs. la pendiente

La pendiente máxima observada para camiones descargados fue del 6%, mientras que para los cargados fue casi del 12% (Figura 6.9). De esta manera, se identificó que la pendiente longitudinal de la recta era un factor importante e influyente en la velocidad del percentil 85 solo en pendientes ascendentes para los camiones cargados. Por tanto, la pendiente longitudinal de la recta fue considerada en este estudio para los camiones cargados.

6.2.3 Análisis descriptivo: velocidad media

Para llevar a cabo el análisis de la velocidad media, se siguió con el mismo procedimiento de la velocidad del percentil 85. De esta manera, la velocidad máxima en la recta fue identificada para cada recta a partir de los perfiles de velocidad media (V_m) de cada tramo.

De igual forma, se llevó a cabo un análisis preliminar de correlación por separado para 33 rectas con camiones cargados y 26 rectas con camiones descargados con el fin de identificar qué variables presentaban una mayor influencia sobre la velocidad media en rectas (Tabla 6.14 y Tabla 6.15).

Tabla 6.14 Matriz de correlación de la velocidad media: camiones cargados

VARIABLES		Vm (km/h)	LR (m)	Vmmcp (Km/h)	RC1 (m)	LC1 (m)	γ C1 (gon)	RC2 (m)	LC2 (m)	γ C2 (gon)	CCRc_r_c (gon/km)	CCRc_r (gon/km)	CCRc (gon/km)	CCR (gon/km)
Vm (km/h)	R	1												
	Valor P													
LR (m)	R	0,78495	1											
	Valor P	6,38E-08												
Vmmcp (km/h)	R	0,94086	0,75516	1										
	Valor P	0	3,80E-07											
RC1 (m)	R	0,37383	0,42706	0,41334	1									
	Valor P	0,03211	0,01319	0,0168										
LC1 (m)	R	0,23639	0,25891	0,21628	0,11319	1								
	Valor P	0,18534	0,1457	0,2267	0,53054									
γ C1 (gon)	R	-0,32941	-0,30283	-0,3511	-0,48581	0,59974	1							
	Valor P	0,06121	0,0867	0,04513	0,00416	0,00023								
RC2 (m)	R	0,30429	0,21516	0,34665	0,08456	0,08198	-0,12608	1						
	Valor P	0,08513	0,22918	0,04812	0,63988	0,65017	0,48445							
LC2 (m)	R	0,28046	0,24443	0,25026	0,16205	0,48049	0,22034	-0,02653	1					
	Valor P	0,1139	0,17041	0,16012	0,36759	0,00465	0,21789	0,88347						
γ C2 (gon)	R	-0,19087	-0,09854	-0,27043	0,0885	0,04026	0,07335	-0,58694	0,51591	1				
	Valor P	0,28733	0,58536	0,12797	0,62431	0,82394	0,68497	0,00033	0,00212					
CCRc_r_c (gon/km)	R	-0,75913	-0,6365	-0,71817	-0,38114	-0,17199	0,47303	-0,45562	-0,16094	0,39016	1			
	Valor P	3,04E-07	0,00007	2,53E-06	0,02864	0,33854	0,00543	0,00771	0,37092	0,02479				
CCRc_r (gon/km)	R	-0,6191	-0,52051	-0,57279	-0,53049	0,10468	0,75757	-0,17501	-0,11225	0,04509	0,83463	1		
	Valor P	0,00012	0,0019	0,00049	0,00149	0,5621	3,32E-07	0,32999	0,53399	0,80321	1,57E-09			
CCRc (gon/km)	R	-0,6146	-0,48451	-0,62934	-0,74844	-0,27542	0,50567	-0,3092	-0,18961	0,17117	0,76336	0,74225	1	
	Valor P	0,00014	0,00427	0,00009	5,49E-07	0,12082	0,00268	0,07995	0,29057	0,34087	2,39E-07	7,64E-07		
CCR (gon/km)	R	-0,63634	-0,49392	-0,6185	-0,22411	-0,40607	-0,02182	-0,28892	-0,27462	0,25665	0,66066	0,37063	0,49701	1
	Valor P	0,00007	0,00349	0,00012	0,20992	0,01904	0,90404	0,10295	0,12195	0,14936	0,00003	0,03373	0,00326	

Tabla 6.15 Matriz de correlación de la velocidad media: camiones descargados

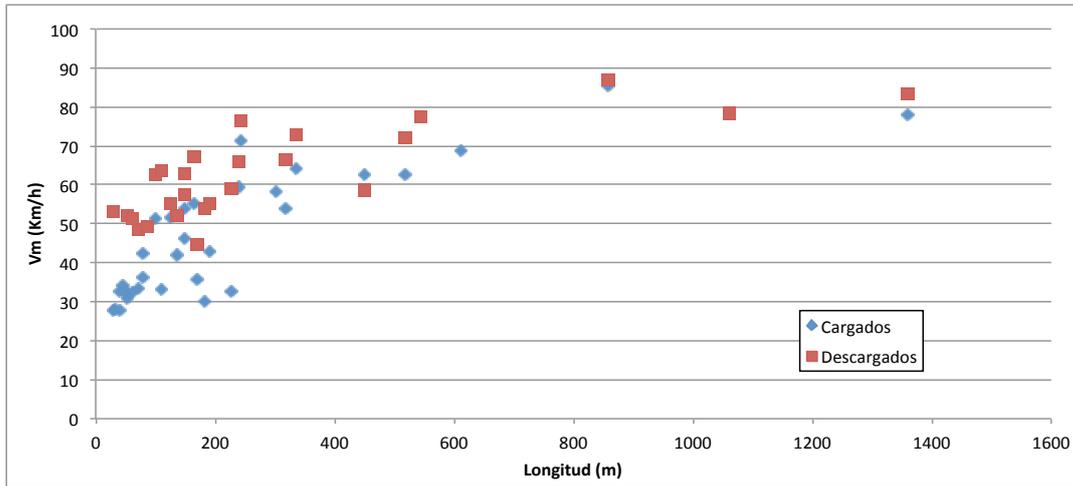
VARIABLES		Vm (km/h)	LR (m)	Vmmcp (Km/h)	RC1 (m)	LC1 (m)	γ C1 (gon)	RC2 (m)	LC2 (m)	γ C2 (gon)	CCRc_r_c (gon/km)	CCRc_r (gon/km)	CCRc (gon/km)	CCR (gon/km)
Vm (km/h)	R	1												
	Valor P													
LR (m)	R	0,7796	1											
	Valor P	3,21E-06												
Vmmcp (km/h)	R	0,78318	0,37037	1										
	Valor P	3,68E-06	0,06838											
RC1 (m)	R	0,36648	0,19571	0,45661	1									
	Valor P	0,07156	0,34846	0,02177										
LC1 (m)	R	0,43027	0,23119	0,29822	0,04516	1								
	Valor P	0,0318	0,26617	0,14763	0,83027									
γ C1 (gon)	R	-0,22576	-0,02916	-0,4191	-0,63512	0,45521	1							
	Valor P	0,27788	0,88996	0,03704	0,00065	0,02223								
RC2 (m)	R	0,73884	0,68099	0,46625	0,07384	0,08	-0,19771	1						
	Valor P	0,00002	0,00018	0,01881	0,72577	0,70385	0,34346							
LC2 (m)	R	0,22569	0,16592	0,08574	-0,08533	0,40254	0,16412	0,21428	1					
	Valor P	0,27803	0,428	0,68363	0,68507	0,04605	0,43307	0,3037						
γ C2 (gon)	R	-0,39183	-0,38722	-0,26192	-0,2306	0,2025	0,2345	-0,53377	0,61139	1				
	Valor P	0,05273	0,05583	0,20595	0,26742	0,33166	0,2592	0,00599	0,00117					
CCRc_r_c (gon/km)	R	-0,80703	-0,62981	-0,54062	-0,44349	-0,13392	0,38406	-0,68449	0,0773	0,70209	1			
	Valor P	1,09E-06	0,00074	0,00527	0,02638	0,52333	0,05804	0,00016	0,71343	0,00009				
CCRc_r (gon/km)	R	-0,72574	-0,53167	-0,49148	-0,59237	-0,06649	0,58351	-0,53368	-0,04698	0,44813	0,90104	1		
	Valor P	0,00004	0,00623	0,01259	0,00181	0,75219	0,0022	0,006	0,82353	0,02467	8,20E-10			
CCRc (gon/km)	R	-0,57535	-0,18233	-0,63012	-0,663	-0,28332	0,65462	-0,30439	-0,16728	0,1062	0,50705	0,68096	1	
	Valor P	0,00262	0,38304	0,00074	0,0003	0,16994	0,00038	0,13904	0,42415	0,61338	0,00968	0,00018		
CCR (gon/km)	R	-0,6819	-0,50633	-0,50254	-0,29195	-0,27548	0,15975	-0,50854	-0,24627	0,24997	0,61082	0,53681	0,34512	1
	Valor P	0,00017	0,0098	0,01046	0,15675	0,18259	0,44559	0,00944	0,23535	0,22816	0,00118	0,00566	0,0911	

Este análisis encontró para la velocidad media, correlaciones muy similares a las de la velocidad del percentil 85 para camiones cargados y descargados.

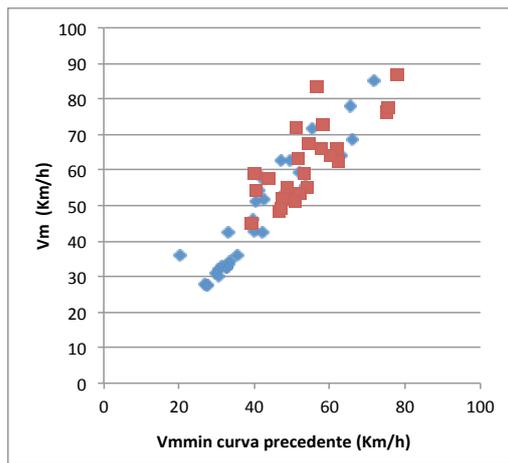
En los camiones cargados las variables con mayor coeficiente de correlación positiva fueron la velocidad media mínima de la curva precedente (V_{mmin}) (0,9409) y la longitud de la recta (L_C) (0,7950), mientras que las variables con mayor coeficiente de correlación negativa fueron la tasa de cambio de curvatura de la curva precedente-recta-curva posterior ($CCR_{c_r_c}$) (0,7591) y la tasa de cambio de curvatura del tramo (CCR) (0,6363).

En camiones descargados las variables con mayor coeficiente de correlación positiva fueron la longitud de la recta (L_C) (0,7832) y la velocidad media mínima de la curva precedente (V_{mmin}) (0,7796), mientras las variables con mayor coeficiente de correlación negativa fueron la tasa de cambio de curvatura de la curva precedente-recta-curva posterior ($CCR_{c_r_c}$) (0,8070) y la tasa de cambio de curvatura del tramo (CCR) (0,7257).

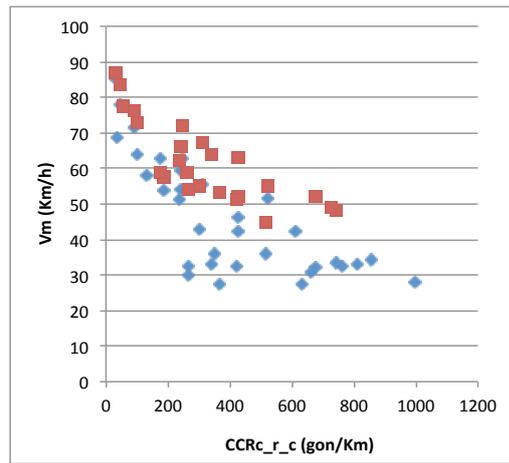
La Figura 6.10 muestra estas variables versus la velocidad media, para camiones cargados y descargados.



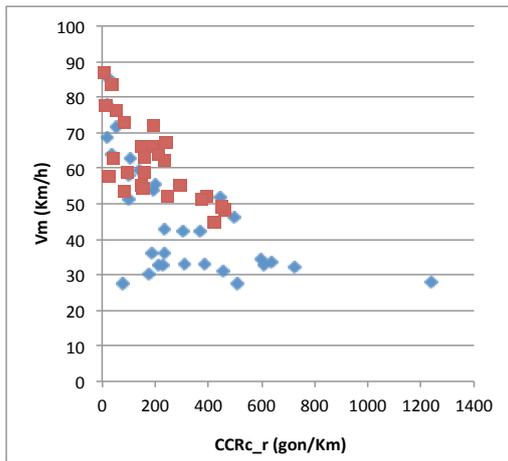
(a)



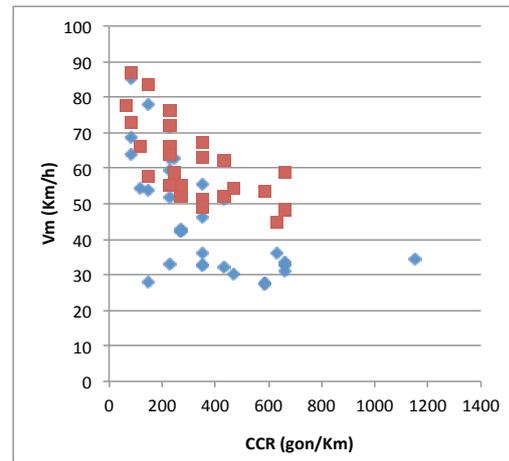
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.10 Velocidad media (V_m) vs. las variables geométricas del trazado en planta

Como para el análisis de la velocidad del percentil 85, la relación entre el alzado y la velocidad media fue estudiada a partir de la pendiente longitudinal de la recta. Cabe recordar que la pendiente máxima para los camiones descargados fue del 6%, mientras que para los cargados fue casi el doble.

La Figura 6.11 muestra la relación entre la pendiente y la velocidad media. A la vista de este gráfico, la pendiente longitudinal de la recta fue solo considerada para el estudio de los camiones cargados

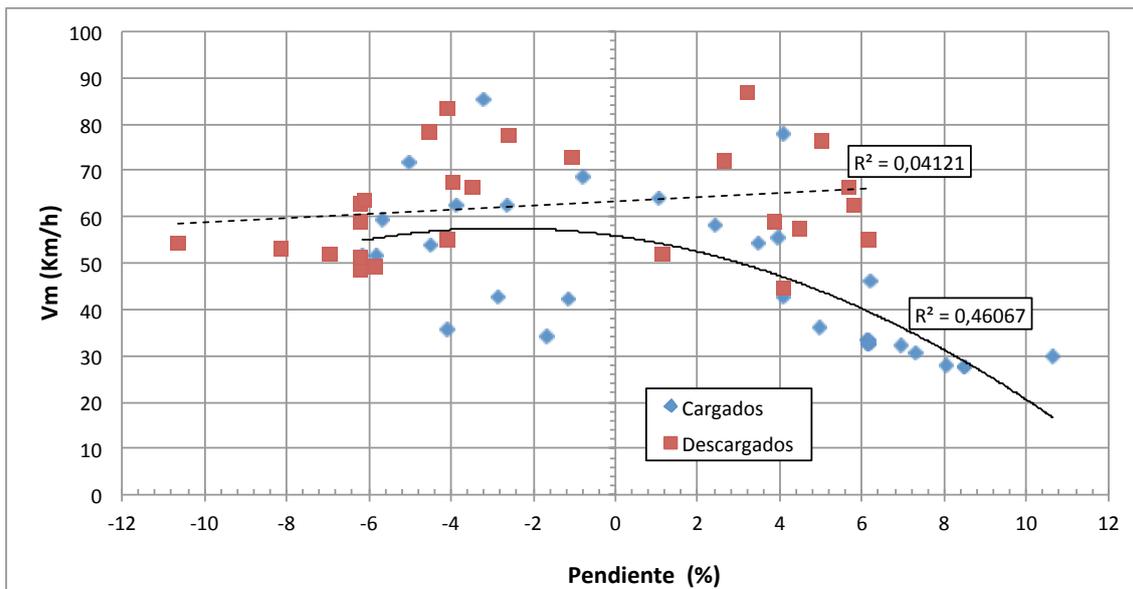


Figura 6.11 Velocidad media (V_m) vs. La pendiente

6.2.4 Análisis descriptivo: velocidad del percentil 15

Para llevar a cabo el análisis de la velocidad del percentil 15, se siguió el mismo procedimiento que en los epígrafes anteriores. De esta manera, la velocidad máxima fue identificada para cada recta a partir de los perfiles de velocidad del percentil 15 de cada tramo.

Las matrices de correlación relativas a dicho percentil de velocidad y las diferentes variables geométricas e índices de trazado se muestran en la (Tabla 6.16 y Tabla 6.17) para camiones cargados y descargados.

Este análisis encontró para la velocidad del percentil 15, correlaciones muy similares a las de la velocidad del percentil 85 y la velocidad media para camiones cargados y descargados.

En los camiones cargados las variables con mayor coeficiente de correlación positiva fueron la V_{15} mínima de la curva precedente (V_{15min}) (0,9367) y la longitud de la recta (L_C) (0,7709), mientras las variables con mayor coeficiente de correlación negativa fueron la tasa de cambio de curvatura de la curva precedente-recta-curva posterior ($CCR_{c_r_c}$) (0,8346), y la tasa de cambio de curvatura del tramo (CCR) (0,6304).

En camiones descargados las variables con mayor coeficiente de correlación positiva fueron la V_m mínima de la curva precedente (V_{15min}) (0,8064) y la longitud de la recta (L_C) (0,7633), mientras las variables con mayor coeficiente de correlación negativa fueron la tasa de cambio de curvatura de la curva precedente-recta-curva posterior ($CCR_{c_r_c}$) (0,7815), y la tasa de cambio de curvatura del tramo (CCR) (0,7009).

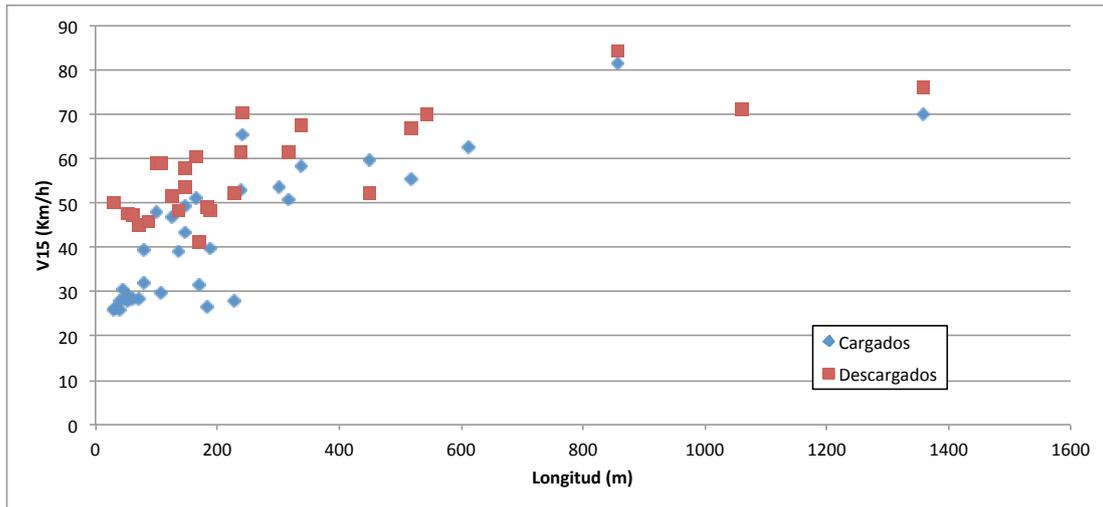
La Figura 6.12 muestra estas variables versus la velocidad media, para camiones cargados y descargados.

Tabla 6.16 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 15: camiones cargados

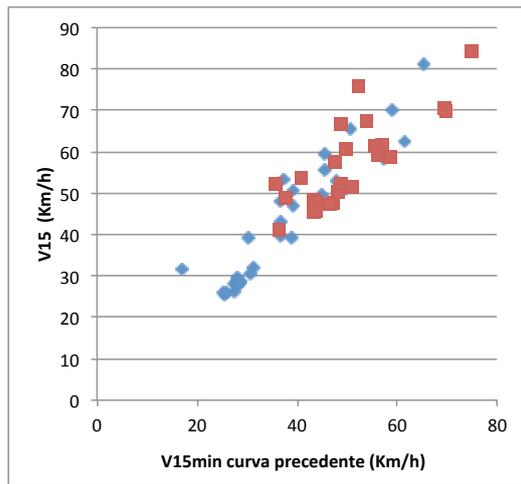
VARIABLES		V15 (km/h)	LR (m)	V15mcp (Km/h)	RC1 (m)	LC1 (m)	γ C1 (gon)	RC2 (m)	LC2 (m)	γ C2 (gon)	CCRc_r_c (gon/km)	CCRc_r (gon/km)	CCRc (gon/km)	CCR (gon/km)
V15 (km/h)	R	1												
	Valor P													
LR (m)	R	0,76328	1											
	Valor P	6,76E-06												
V15mcp (km/h)	R	0,80635	0,37199	1										
	Valor P	1,13E-06	0,06709											
RC1 (m)	R	0,36443	0,19571	0,45556	1									
	Valor P	0,07329	0,34846	0,02211										
LC1 (m)	R	0,39919	0,23119	0,30724	0,04516	1								
	Valor P	0,04806	0,26617	0,13518	0,83027									
γ C1 (gon)	R	-0,24099	-0,02916	-0,41136	-0,63512	0,45521	1							
	Valor P	0,24586	0,88996	0,04106	0,00065	0,02223								
RC2 (m)	R	0,74225	0,68099	0,46464	0,07384	0,08	-0,19771	1						
	Valor P	0,00002	0,00018	0,01928	0,72577	0,70385	0,34346							
LC2 (m)	R	0,2249	0,16592	0,09214	-0,08533	0,40254	0,16412	0,21428	1					
	Valor P	0,27975	0,428	0,66135	0,68507	0,04605	0,43307	0,3037						
γ C2 (gon)	R	-0,38875	-0,38722	-0,25009	-0,2306	0,2025	0,2345	-0,53377	0,61139	1				
	Valor P	0,05479	0,05583	0,22793	0,26742	0,33166	0,2592	0,00599	0,00117					
CCRc_r_c (gon/km)	R	-0,78147	-0,62981	-0,52796	-0,44349	-0,13392	0,38406	-0,68449	0,0773	0,70209	1			
	Valor P	3,99E-06	0,00074	0,00667	0,02638	0,52333	0,05804	0,00016	0,71343	0,00009				
CCRc_r (gon/km)	R	-0,70088	-0,53167	-0,48316	-0,59237	-0,06649	0,58351	-0,53368	-0,04698	0,44813	0,90104	1		
	Valor P	0,0001	0,00623	0,01442	0,00181	0,75219	0,0022	0,006	0,82353	0,02467	8,20E-10			
CCRc (gon/km)	R	-0,57083	-0,18233	-0,64037	-0,663	-0,28332	0,65462	-0,30439	-0,16728	0,1062	0,50705	0,68096	1	
	Valor P	0,00288	0,38304	0,00056	0,0003	0,16994	0,00038	0,13904	0,42415	0,61338	0,00968	0,00018		
CCR (gon/km)	R	-0,6814	-0,50633	-0,49793	-0,29195	-0,27548	0,15975	-0,50854	-0,24627	0,24997	0,61082	0,53681	0,34512	1
	Valor P	0,00018	0,0098	0,01131	0,15675	0,18259	0,44559	0,00944	0,23535	0,22816	0,00118	0,00566	0,0911	

Tabla 6.17 Matriz de correlación de la velocidad del percentil 15: camiones descargados

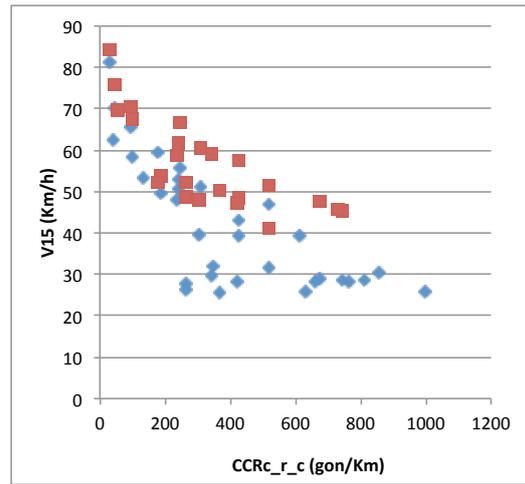
VARIABLES		V15 (km/h)	LR (m)	V15mcp (Km/h)	RC1 (m)	LC1 (m)	γ C1 (gon)	RC2 (m)	LC2 (m)	γ C2 (gon)	CCRc_r_c (gon/km)	CCRc_r (gon/km)	CCRc (gon/km)	CCR (gon/km)
V15 (km/h)	R	1												
	Valor P													
LR (m)	R	0,76328	1											
	Valor P	6,76E-06												
V15mcp (km/h)	R	0,80635	0,37199	1										
	Valor P	1,13E-06	0,06709											
RC1 (m)	R	0,36443	0,19571	0,45556	1									
	Valor P	0,07329	0,34846	0,02211										
LC1 (m)	R	0,39919	0,23119	0,30724	0,04516	1								
	Valor P	0,04806	0,26617	0,13518	0,83027									
γ C1 (gon)	R	-0,24099	-0,02916	-0,41136	-0,63512	0,45521	1							
	Valor P	0,24586	0,88996	0,04106	0,00065	0,02223								
RC2 (m)	R	0,74225	0,68099	0,46464	0,07384	0,08	-0,19771	1						
	Valor P	0,00002	0,00018	0,01928	0,72577	0,70385	0,34346							
LC2 (m)	R	0,2249	0,16592	0,09214	-0,08533	0,40254	0,16412	0,21428	1					
	Valor P	0,27975	0,428	0,66135	0,68507	0,04605	0,43307	0,3037						
γ C2 (gon)	R	-0,38875	-0,38722	-0,25009	-0,2306	0,2025	0,2345	-0,53377	0,61139	1				
	Valor P	0,05479	0,05583	0,22793	0,26742	0,33166	0,2592	0,00599	0,00117					
CCRc_r_c (gon/km)	R	-0,78147	-0,62981	-0,52796	-0,44349	-0,13392	0,38406	-0,68449	0,0773	0,70209	1			
	Valor P	3,99E-06	0,00074	0,00667	0,02638	0,52333	0,05804	0,00016	0,71343	0,00009				
CCRc_r (gon/km)	R	-0,70088	-0,53167	-0,48316	-0,59237	-0,06649	0,58351	-0,53368	-0,04698	0,44813	0,90104	1		
	Valor P	0,0001	0,00623	0,01442	0,00181	0,75219	0,0022	0,006	0,82353	0,02467	8,20E-10			
CCRc (gon/km)	R	-0,57083	-0,18233	-0,64037	-0,663	-0,28332	0,65462	-0,30439	-0,16728	0,1062	0,50705	0,68096	1	
	Valor P	0,00288	0,38304	0,00056	0,0003	0,16994	0,00038	0,13904	0,42415	0,61338	0,00968	0,00018		
CCR (gon/km)	R	-0,6814	-0,50633	-0,49793	-0,29195	-0,27548	0,15975	-0,50854	-0,24627	0,24997	0,61082	0,53681	0,34512	1
	Valor P	0,00018	0,0098	0,01131	0,15675	0,18259	0,44559	0,00944	0,23535	0,22816	0,00118	0,00566	0,0911	



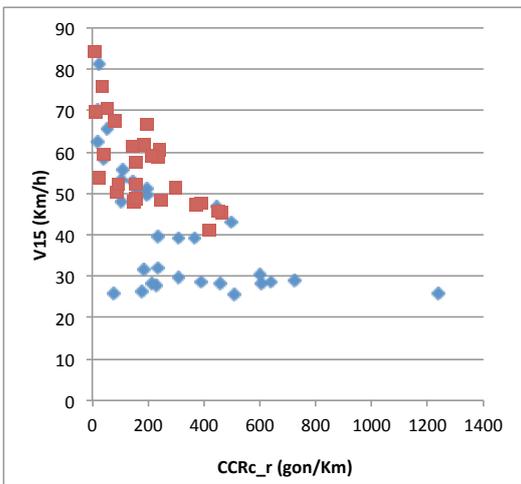
(a)



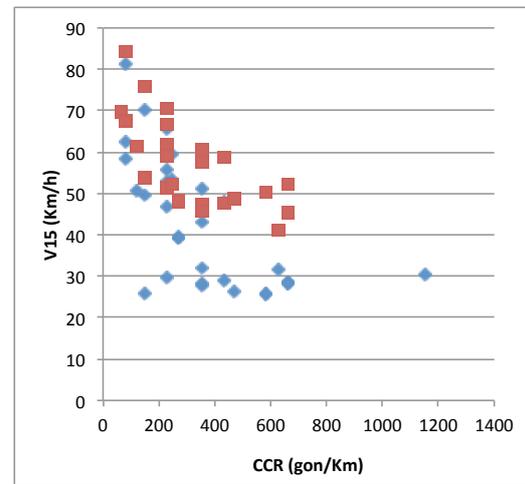
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.12 Velocidad del percentil 15 (V_{15}) vs. las variables geométricas del trazado en planta

Como para el análisis de la velocidad del percentil 85 y la velocidad media, la relación entre el alzado y la velocidad del percentil 15 fue estudiada a partir de la pendiente longitudinal de la recta. Cabe recordar que la pendiente máxima

para los camiones descargados fue del 6%, mientras que para los cargados fue casi el doble.

La Figura 6.13 muestra la relación entre la pendiente y la velocidad media. A la vista de este gráfico, la pendiente longitudinal de la recta fue solo considerada para el estudio de los camiones cargados

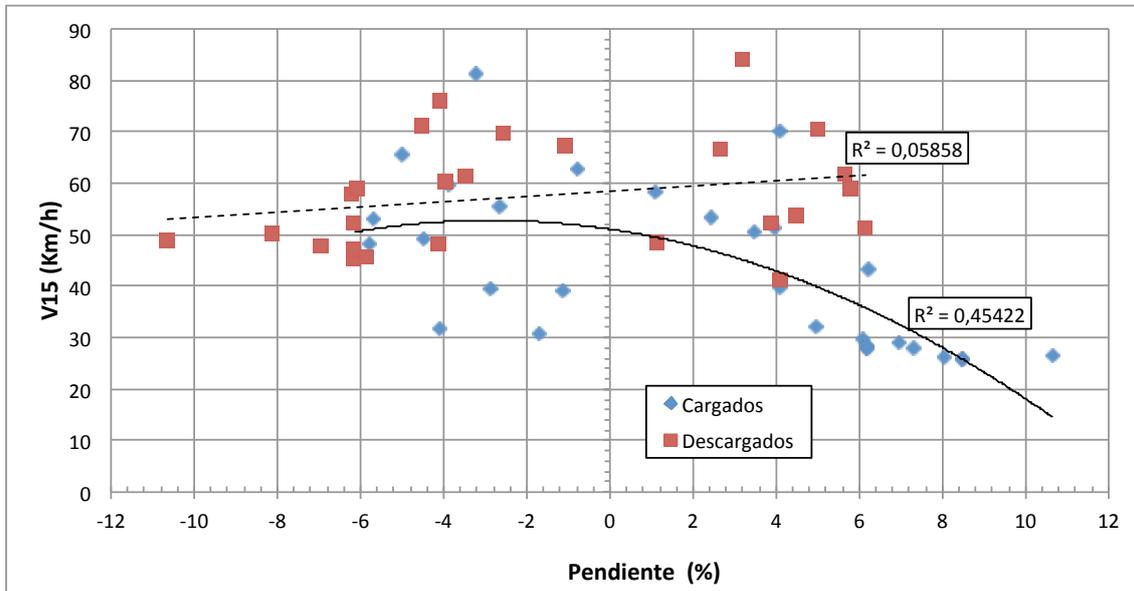


Figura 6.13 Velocidad del percentil 15 (V_{15}) vs. La pendiente

7 DESARROLLO DE MODELOS DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN

En el presente apartado se presentan diferentes modelos de regresión para la velocidad del percentil 85, la velocidad media y la velocidad del percentil 15. Estos modelos fueron calibrados para curvas y rectas, tanto para camiones cargados como descargados.

7.1 MODELOS PARA CURVAS

Una vez analizadas las relaciones existentes entre las diferentes variables geométricas e índices de trazado relacionados con el trazado en planta y en alzado y las velocidades de los vehículos pesados en curvas, se llevó a cabo el desarrollo de diferentes modelos.

En esta fase, los modelos se desarrollaron con las variables que mejor correlación mostraron y posteriormente se identificaron cuáles de ellas eran capaces de estimar mejor la velocidad mínima en curvas.

De esta forma, las variables tenidas en cuenta fueron: radio de la curva (R), ángulo de deflexión (γ), tasa de cambio de curvatura (CCR) y pendiente en el punto de curvatura (ρ).

La forma funcional de los modelos calibrados responden a las tendencias observadas en el análisis descriptivo del Capítulo 6 de este Trabajo de Fin de Master. En este sentido, las variables mencionadas en el anterior párrafo presentan todas ellas una tendencia asintótica con respecto a la velocidad. Por tanto, se ha propuesto el estudio de las siguientes formas funcionales, donde v es la velocidad, X la variable independiente y β_i los parámetros de regresión del modelo.

$$v = \beta_1 + \beta_2/X$$

$$v = \beta_1 + \beta_2/(X + \beta_3)$$

$$v = \sqrt{\beta_1 + \beta_2 \cdot \ln(X)}$$

$$v = \beta_1 + \beta_2/e^{\beta_3 \cdot X}$$

7.1.1 Modelización de la velocidad del percentil 85

En primer lugar, se calibraron diferentes modelos para estimar la velocidad del percentil 85 (V_{85}) para camiones cargados teniendo en cuenta solo el trazado en planta (Tabla 7.1).

Tabla 7.1 Modelos de regresión para estimar la V_{85} de camiones cargados

Modelo	Expresión	R^2
CC ₈₅ 1	$v_{85C} = 59,14 - 755,25/R$	42,80%
CC ₈₅ 2	$v_{85C} = 81,12 - 8.359,90/(R + 154,23)$	59,15%
CC ₈₅ 3	$v_{85C} = \sqrt{-2.461,95 + 1.070,25 \cdot \ln(R)}$	58,16%
CC ₈₅ 4	$v_{85C} = 73,76 - 46,45/e^{0,0072 \cdot R}$	61,27%
CC ₈₅ 5	$v_{85C} = 36,85 - 1.790,74/CCR$	39,39%
CC ₈₅ 6	$v_{85C} = 26,76 - 7.426,16/(CCR + 139,90)$	44,13%
CC ₈₅ 7	$v_{85C} = \sqrt{8.365,53 - 1.091,41 \cdot \ln(CCR)}$	42,98%
CC ₈₅ 8	$v_{85C} = 37,40 + 37,16/e^{0,0056 \cdot CCR}$	44,98%
CC ₈₅ 9	$v_{85C} = 41,65 - 157,01/\gamma$	26,65%
CC ₈₅ 10	$v_{85C} = 26,48 - 1.378,61/(\gamma + 25,24)$	59,63%
CC ₈₅ 11	$v_{85C} = \sqrt{6.487,66 - 1.115,06 \cdot \ln(\gamma)}$	58,23%
CC ₈₅ 12	$v_{85C} = 34,05 + 42,66/e^{0,0283 \cdot \gamma}$	60,18%

donde v_{85C} = Velocidad de operación de camiones cargados (km/h); R = Radio de la curva (m); CCR = Tasa de cambio de curvatura del tramo (gon/km); y γ = Ángulo de deflexión de la curva (gon)

La Figura 7.1 muestra la representación gráfica de los 12 modelos para estimar la velocidad del percentil 85 de camiones cargados, teniendo en cuenta solo el trazado en planta.

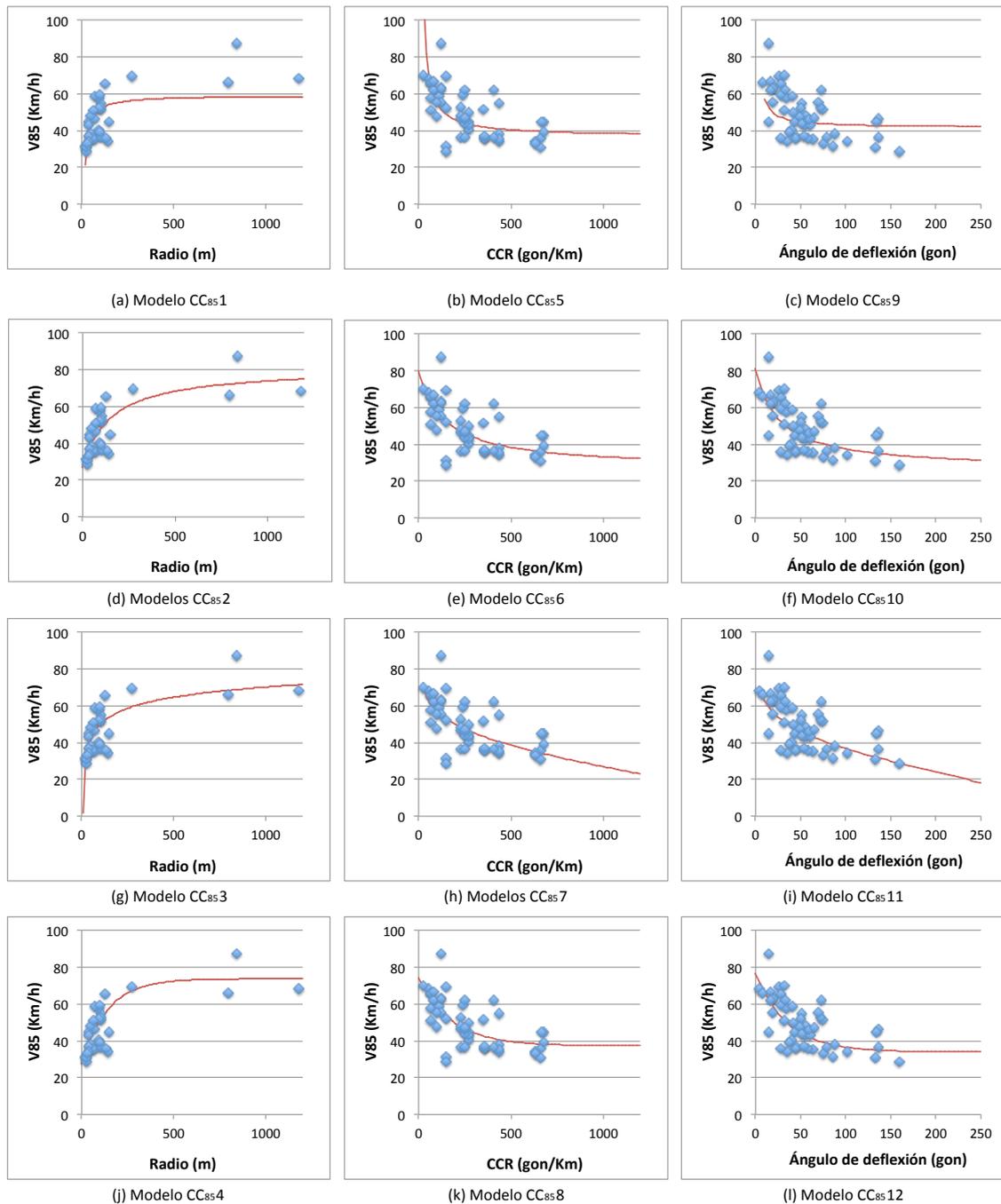


Figura 7.1 Modelos de regresión para estimar la V_{85} de camiones cargados

Los modelos CC₈₅1, CC₈₅5 y CC₈₅9 corresponden al cálculo de la inversa de la variable independiente (Figura 7.1a, Figura 7.1b y Figura 7.1c). En este caso, el radio presentó un R^2 mayor que los modelos del CCR y el ángulo de deflexión. Sin embargo, en los tres modelos se detectaron deficiencias. Por una parte, en el caso del modelo CC₈₅1, para valores altos de la variable independiente, la velocidad se subestima considerablemente. En el caso de los modelos CC₈₅5 y CC₈₅9, cuando el valor de la variable independiente es reducido, se presentan limitaciones para el cálculo de la velocidad.

Los modelos $CC_{85}2$, $CC_{85}6$ y $CC_{85}10$, que incorporaban un parámetro adicional con respecto a los modelos anteriores ($CC_{85}1$, $CC_{85}5$ y $CC_{85}9$), mostraron un aumento considerable del parámetro de bondad de ajuste (Figura 7.1d, Figura 7.1e y Figura 7.1f). Específicamente, se produjo un desplazamiento en el eje vertical de la función, lo que se tradujo en un mejor ajuste con respecto a los datos observados. En este caso, el ángulo de deflexión fue la variable que mayor R^2 alcanzó. Sin embargo, su diferencia con el radio no fue mayor al 1%.

Los modelos $CC_{85}3$, $CC_{85}7$ y $CC_{85}11$ corresponden a una relación lineal entre el cuadrado de la variable dependiente y el logaritmo neperiano de la variable independiente (Figura 7.1g, Figura 7.1h y Figura 7.1i). Estos modelos presentaron un ajuste ligeramente peor que los modelos $CC_{85}2$, $CC_{85}6$ y $CC_{85}10$, lo que se puede observar tanto en su representación gráfica como a través de los parámetros de bondad de ajuste obtenidos. En este caso, el ángulo de deflexión también fue la variable que mayor R^2 alcanzó. Sin embargo, su diferencia con el radio no fue mayor al 1%.

Por último, se calibraron los modelos $CC_{85}4$, $CC_{85}8$ y $CC_{85}12$ (Figura 7.1j, Figura 7.1k y Figura 7.1l). Estos modelos presentaron un R^2 mayor a todos los modelos anteriores. En este caso, el radio fue la variable que obtuvo el mayor R^2 .

Por lo anterior, el radio fue la variable del trazado en planta que mejor explicó la velocidad del percentil 85 en curvas. De las cuatro formas funcionales estudiadas con el radio como variable independiente, la que mayor ajuste presentó fue la aplicada en el modelo $CC_{85}4$.

De igual forma, con el modelo $CC_{85}4$ se obtienen velocidades positivas incluso para cuando el radio es menor a 50 m. Por otra parte, para radios amplios la velocidad tiende a poco más de 78 km/h, ajustándose adecuadamente a los datos observados y describiendo mejor el fenómeno.

Con el fin de mejorar el modelo obtenido a partir de una variable del trazado en planta, se analizó la introducción de la pendiente como segunda variable explicativa. Para ello, a partir del modelo $CC_{85}4$ se llevó a cabo un análisis de residuos en función de la pendiente (Figura 7.2). Este análisis mostró una distribución homogénea de residuos cercana a cero hasta un cierto valor de la pendiente a partir del cual los residuos decrecían de manera lineal.

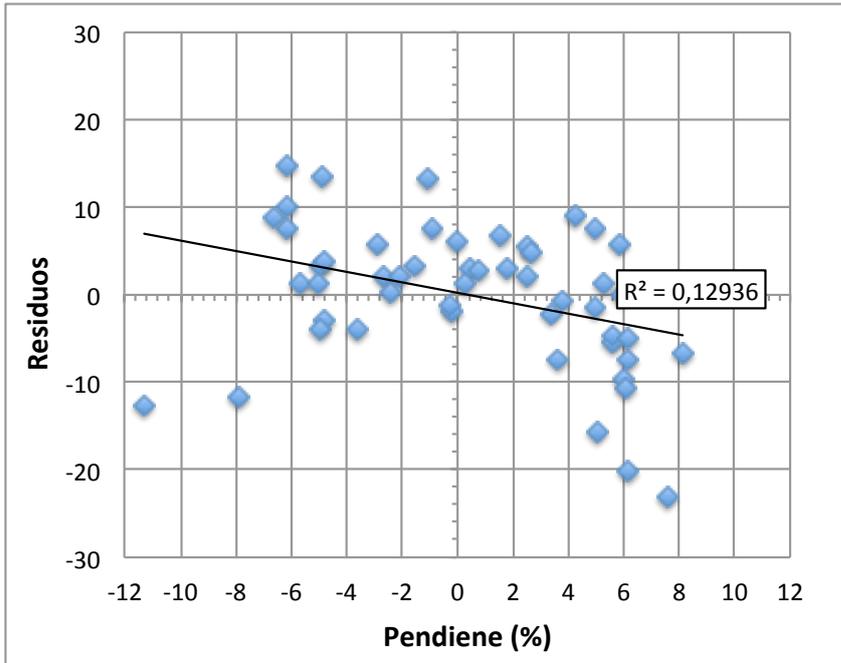


Figura 7.2 Análisis de residuos vs. pendiente para camiones cargados

De esta manera, se estableció el modelo compuesto para camiones cargados CC₈₅13 que se muestra en la Tabla 7.2. En este se puede observar como el R² aumentó un 13% respecto al modelo CC₈₅4.

Tabla 7.2 Modelo compuesto para la estimación de la V₈₅ de camiones cargados

Modelo	Expresión	R ²
CC ₈₅ 13	$V_{85C} = \begin{cases} 75,96 - \frac{44,56}{e^{0,00685 \cdot R}} & \text{Si } p \leq 4,23\% \\ 75,96 - \frac{44,56}{e^{0,00685 \cdot R}} - 5,06 \cdot (p - 4,23) & \text{Si } p > 4,23\% \end{cases}$	74,18%

donde v_{85C} = Velocidad de operación de camiones cargados (km/h); R = Radio de la curva (m); y p= Pendiente en el punto de curvatura (%)

La Figura 7.3 muestra la representación gráfica del modelo CC13.

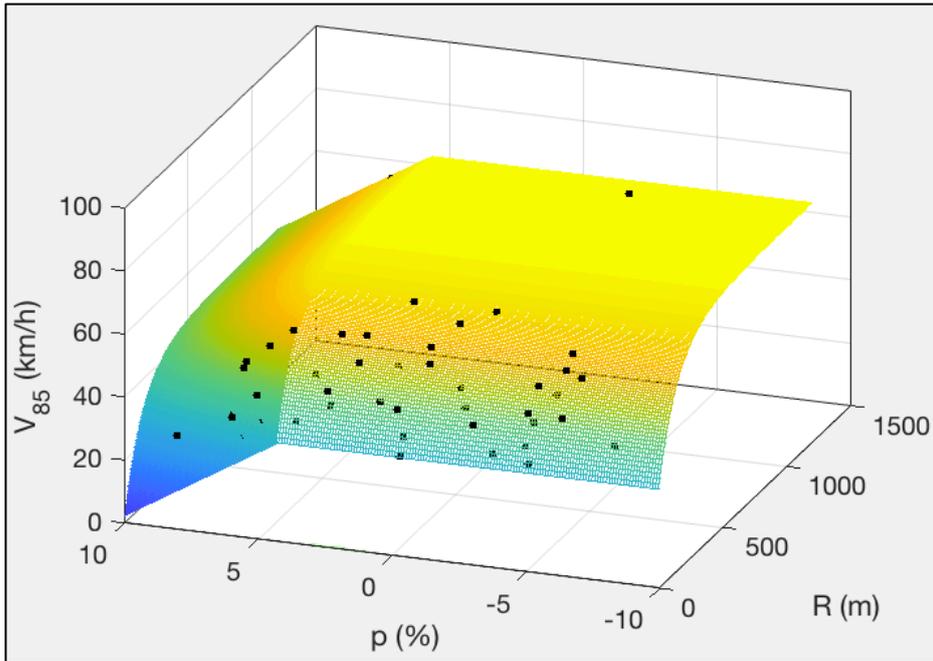


Figura 7.3 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones cargados

Para la calibración de los modelos de los camiones descargados se llevó a cabo el mismo procedimiento que para los camiones cargados. De esta forma, el modelo $CD_{85}1$ fue el que mayor R^2 presentó teniendo en cuenta las variables del trazado en planta (Tabla 7.3).

Tabla 7.3 Modelo de regresión para estimar la V_{85} de camiones descargados

Modelo	Expresión	R^2
$CD_{85}1$	$v_{85D} = 87,55 - 60,37/e^{0,0102 \cdot R}$	74,96%

donde: v_{85D} = Velocidad de operación de camiones descargados (km/h) y R = Radio de la curva (m)

De igual forma, con el modelo $CD_{85}1$ se obtienen velocidades positivas incluso para cuando el radio es menor a 50 m. Por otra parte, para radios amplios la velocidad tiende a aproximadamente 88 km/h, ajustándose adecuadamente a los datos observados y describiendo adecuadamente el fenómeno (Figura 7.4).

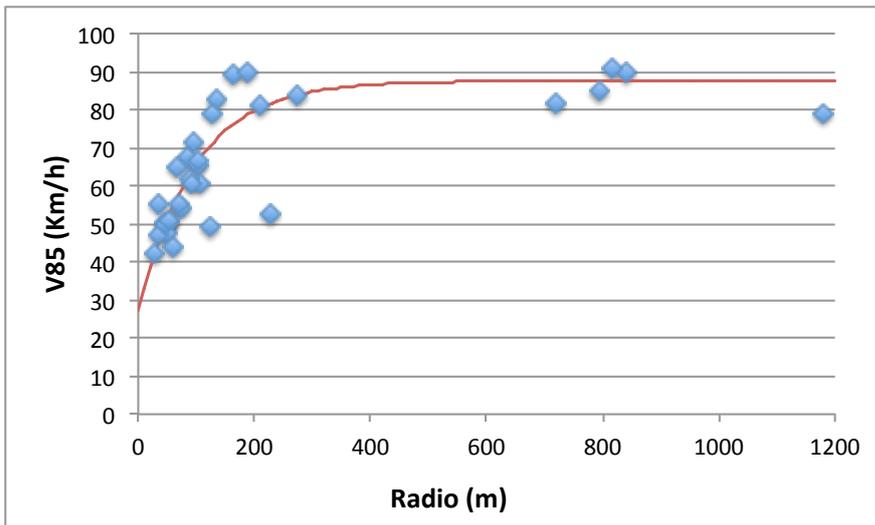


Figura 7.4 Modelo para estimar la V_{85} de camiones descargados

Con el fin de mejorar el modelo obtenido a partir de una variable del trazado en planta, se analizó la introducción de la pendiente como segunda variable explicativa. Para ello, a partir del modelo $CD_{85.1}$ se llevó a cabo un análisis de residuos en función de la pendiente. En este análisis se observó una distribución homogénea de los residuos cercana a cero hasta un cierto valor de la pendiente a partir del cual los residuos decrecían linealmente (Figura 7.5).

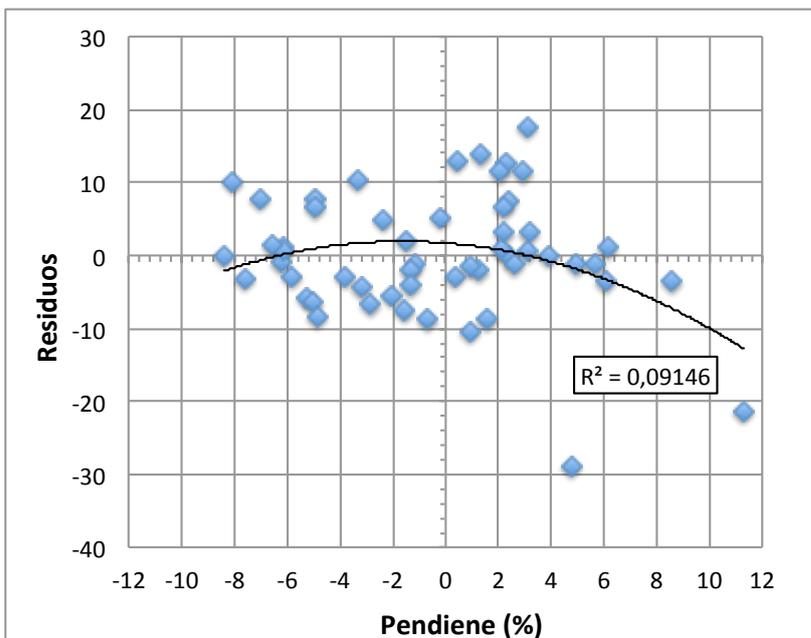


Figura 7.5 Análisis de residuos vs. pendiente para camiones descargados

De esta manera, se estableció el modelo compuesto para camiones descargados $CD_{85.2}$ que se muestra en la Tabla 7.4. En este se puede observar como el R^2 aumentó un 4% respecto al modelo $CD_{85.1}$.

Tabla 7.4 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones descargados

Modelo	Expresión	R^2
CD ₈₅ 2	$V_{85D} = \begin{cases} 85,02 - \frac{60,62}{e^{0,0124 \cdot R}} & \text{Si } p \leq 3,19\% \\ 75,96 - \frac{60,62}{e^{0,0124 \cdot R}} - 1,95 \cdot (p - 3,19) & \text{Si } p > 3,19\% \end{cases}$	78,45%

donde: v_{85D} = Velocidad de operación de camiones descargados (km/h); R = Radio de la curva (m); y p= Pendiente en el punto de curvatura (%)

La Figura 7.6 muestra la representación gráfica del modelo CD₈₅2.

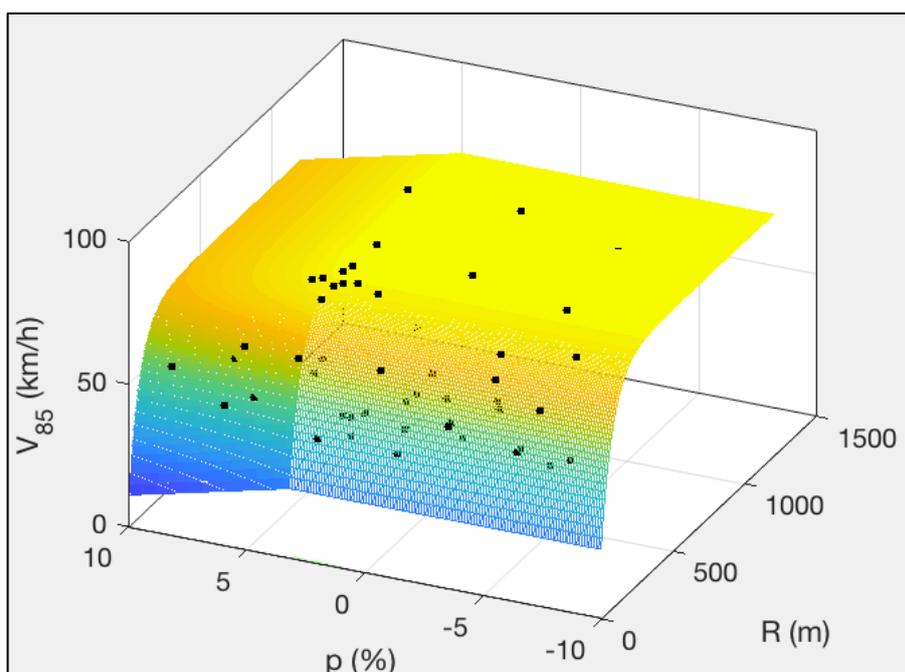


Figura 7.6 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones descargados

7.1.2 Modelización de la velocidad media

Para la velocidad media se siguió el mismo procedimiento que para la velocidad del percentil 85. De esta manera, en primer lugar se calibraron diferentes modelos para estimar la velocidad media para camiones cargados y descargados teniendo en cuenta solo el trazado en planta.

La Tabla 7.5 muestra los modelos que presentaron un mayor ajuste. De igual forma, tienen el radio de la curva como variable explicativa.

Tabla 7.5 Modelos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados

Modelo	Expresión	R^2
CC _{m1}	$v_{mC} = 67,69 - 42,44/e^{0,0074 \cdot R}$	58,74%
CD _{m1}	$v_{mD} = 81,95 - 59,09/e^{0,0106 \cdot R}$	72,49%

donde: v_{mC} = Velocidad media de camiones cargados (km/h); v_{mD} = Velocidad media de camiones descargados (km/h); y R = Radio de la curva (m)

Con el fin de mejorar los modelos obtenidos, al igual que se hizo con los modelos de la velocidad del percentil 85, se introdujo la pendiente como segunda variable explicativa.

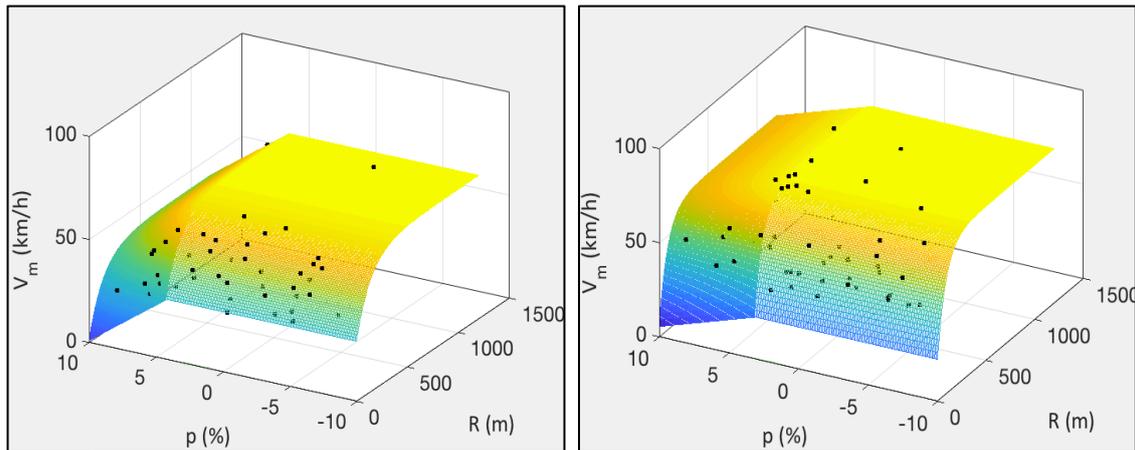
De esta manera, se estableció el modelo compuesto para camiones cargados CC_{m2} y para camiones descargados CD_{m2} que se muestran en la Tabla 7.6. En estos se puede observar como el R^2 aumentó un 16% y un 5% para camiones cargados y descargados, respectivamente.

Tabla 7.6 Modelos compuestos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados

Modelo	Expresión	R^2
CC _{m2}	$V_{mC} = \begin{cases} 69,50 - \frac{40,29}{e^{0,0071R}} & Si p \leq 4,18\% \\ 69,50 - \frac{40,29}{e^{0,0071 \cdot R}} - 4,84 \cdot (p - 4,18) & Si p > 4,18\% \end{cases}$	74,05%
CD _{m2}	$V_{mD} = \begin{cases} 81,98 - \frac{59,96}{e^{0,0116 \cdot R}} & Si p \leq 3,06\% \\ 81,98 - \frac{59,96}{e^{0,0116 \cdot R}} - 2,43 \cdot (p - 3,06) & Si p > 3,06\% \end{cases}$	77,55%

donde: v_{mC} = Velocidad media de camiones cargados (km/h); v_{mD} = Velocidad media de camiones descargados (km/h); R = Radio de la curva (m); y p= Pendiente en el punto de curvatura (%)

La Figura 7.7 muestra la representación gráfica de los modelos CC_{m2} y CD_{m2}.



(a) Camiones Cargados

(b) Camiones Descargados

Figura 7.7 Modelos compuestos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados en curvas

7.1.3 Modelización de la velocidad del percentil 15

Para la velocidad del percentil 15 se siguió el mismo procedimiento que para la velocidad del percentil 85 y velocidad media. Así, en primer lugar se calibraron diferentes modelos para estimar la velocidad del percentil 15 para camiones cargados y descargados teniendo en cuenta solo el trazado en planta.

La Tabla 7.7 muestra los modelos que obtuvieron un mayor índice de bondad de ajuste (R^2). Al igual que para la velocidad del percentil 85 y la velocidad media, el radio de la curva era la variable explicativa más importante.

Tabla 7.7 Modelos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados

Modelo	Expresión	R^2
CC ₁₅₁	$v_{15C} = 60,99 - 38,93/e^{0,008 \cdot R}$	55,03%
CD ₁₅₁	$v_{15D} = 76,66 - 56,72/e^{0,0108 \cdot R}$	69,54%

donde: v_{15C} = Velocidad del percentil 15 de camiones cargados (km/h); v_{15D} = Velocidad del percentil 15 de camiones descargados (km/h); y R = Radio de la curva (m)

Con el fin obtener modelos más precisos, al igual que se hizo con los modelos de la velocidad del percentil 85 y velocidad media, se introdujo la pendiente como segunda variable explicativa.

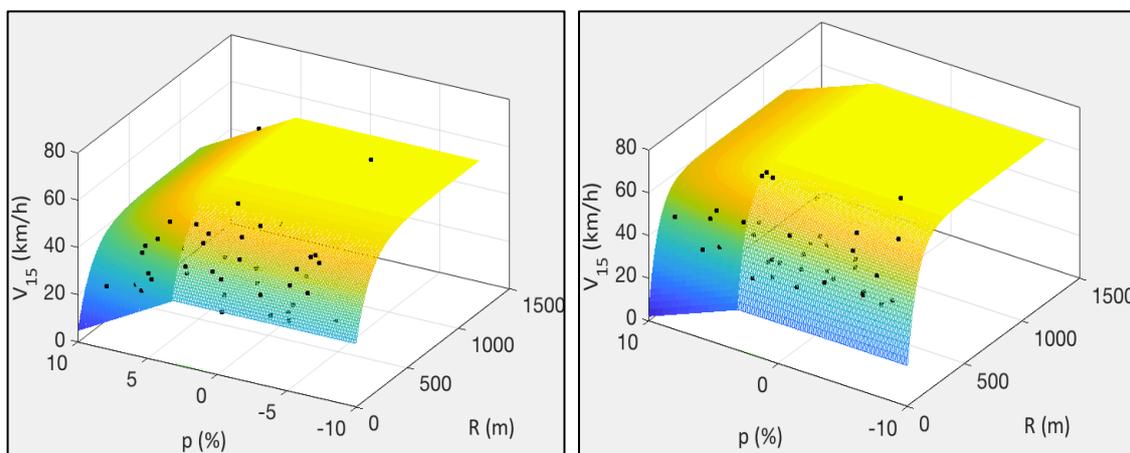
De esta manera, se estableció el modelo compuesto para camiones cargados CC₁₅₂ y para camiones descargados CD₁₅₂ que se muestran en la Tabla 7.8. En estos se puede observar como el R^2 aumentó un 19% y un 8% para camiones cargados y descargados, respectivamente.

Tabla 7.8 Modelos compuestos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados

Modelo	Expresión	R^2
CC ₁₅ 2	$V_{15C} = \begin{cases} 64,17 - \frac{37,23}{e^{0,0072R}} & \text{Si } p \leq 3,14\% \\ 64,17 - \frac{37,23}{e^{0,0072 \cdot R}} - 3,28 \cdot (p - 3,14) & \text{Si } p > 3,14\% \end{cases}$	72,00%
CD ₁₅ 2	$V_{15D} = \begin{cases} 76,74 - \frac{57,58}{e^{0,0118 \cdot R}} & \text{Si } p \leq 3,06\% \\ 76,74 - \frac{57,58}{e^{0,0118 \cdot R}} - 2,43 \cdot (p - 3,06) & \text{Si } p > 3,06\% \end{cases}$	74,76%

donde: v_{15C} = Velocidad del percentil 15 de camiones cargados (km/h); v_{15D} = Velocidad del percentil 15 de camiones descargados (km/h); R = Radio de la curva (m); y p= Pendiente en el punto de curvatura (%)

La Figura 7.8 muestra la representación gráfica de los modelos CC₁₅2 y CD₁₅2.



(a) Camiones Cargados

(b) Camiones Descargados

Figura 7.8 Modelos compuestos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados en curvas

7.2 MODELOS PARA RECTAS

El desarrollo de los diferentes modelos para estimar la velocidad máxima en rectas se llevó a cabo con base al análisis de las relaciones existentes entre las diferentes variables geométricas e índices de trazado relacionados con el trazado en planta y en alzado, las variables operacionales y las velocidades de operación en rectas descrito en el epígrafe 6.2 de este trabajo.

Los modelos se desarrollaron con las variables que mejor correlación mostraron y, posteriormente, se identificaron cuáles de ellas eran capaces de estimar mejor la velocidad máxima que se mantuvo constante, sin influencia de

aceleración o deceleración alguna, independientemente de si se situaba en el centro de la recta o no.

Por tanto, las variables tenidas en cuenta fueron: velocidad empírica mínima de la curva precedente (V_{mcp}), longitud de la recta (L_R), tasa de cambio de curvatura (CCR), y la pendiente longitudinal (p).

7.2.1 Modelización de la velocidad del percentil 85

En primer lugar, se calibraron diferentes modelos para estimar la velocidad del percentil 85 (V_{85}) para camiones cargados sin tener en cuenta el trazado en alzado. La Tabla 7.9 muestra los modelos que obtuvieron mayor R^2 y la Figura 7.9 la representación gráfico de dichos modelos.

Tabla 7.9 Modelos para la estimación de la V_{85} de camiones cargados

Modelo	Expresión	R^2
ReC ₈₅ 1	$v_{85C} = 1,18 \cdot v_{85mcp} - 1,31$	87,59%
ReC ₈₅ 2	$v_{85C} = 129,88 - 156,37/e^{0,159 \cdot v_{85mcp}}$	86,84%
ReC ₈₅ 3	$v_{85C} = 86,57 - 57,58/e^{0,003 \cdot L}$	78,52%

donde: v_{85C} = Velocidad del percentil 85 de camiones cargados (km/h);
 v_{85mcp} = Velocidad del percentil 85 mínima de la curva precedente (km/h); y
 L = Longitud de la recta (m)

Los modelos ReC₈₅1 (Figura 7.9a) y ReC₈₅2 (Figura 7.9b) tienen como variable explicativa la velocidad de operación mínima de la curva precedente, mientras que el modelo ReC₈₅3 considera la longitud de la recta (Figura 7.9c).

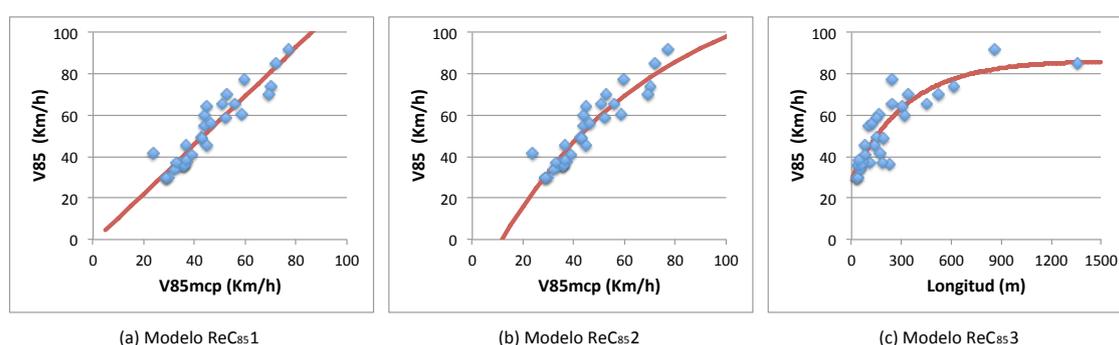


Figura 7.9 Modelos para la estimación de la V_{85} de camiones cargados

En la Figura 7.9a se muestra el modelo puramente lineal, es decir, aquel en que la variable utilizada no ha sufrido ninguna transformación. En este, se observa claramente como la línea recta se adapta adecuadamente a la tendencia de los datos.

La curva representada por el modelo ReC₈₅2 de la Figura 7.9b también se ajustó correctamente a la tendencia de los datos, pero presentó valores negativos de velocidad para valores pequeños de la variable independiente.

La Figura 7.9c muestra como el modelo ReC₈₅3, que tiene como variable explicativa la longitud de la recta, se adapta adecuadamente a los datos observados en campo. En este caso, la V₈₅ aumenta a medida que aumenta la longitud de la recta hasta una cierta longitud a partir de la cual la velocidad permanece constante.

Con el fin de mejorar los modelos obtenidos a partir de una variable, se realizaron diferentes análisis introduciendo la pendiente como segunda variable explicativa. Para ello, a partir de los modelos ReC₈₅1, ReC₈₅2 y ReC₈₅3 se llevó a cabo un análisis de residuos en función de la pendiente. Como muestra la Figura 7.10, los residuos decrecían a medida que aumentaba la pendiente.

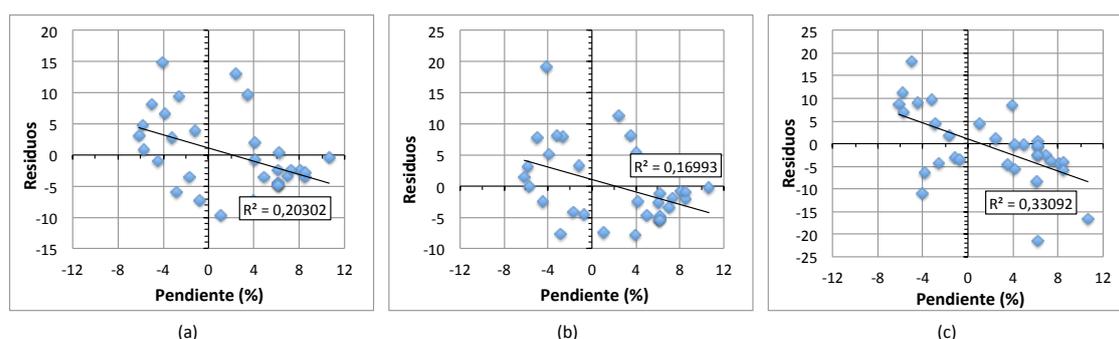


Figura 7.10 Análisis de residuos vs. pendiente para camiones cargados

Así, se calibraron los modelos compuestos para camiones cargados que se muestran en la Tabla 7.10. En estos se puede observar como el R² aumentó un 3% para los modelos ReC₈₅4 y ReC₈₅5, y un 7% para el modelo ReC₈₅6.

Tabla 7.10 Modelos compuestos para la estimación de la V₈₅ de camiones cargados en rectas

Modelo	Expresión	R ²
ReC ₈₅ 4	$v_{85C} = 5,70 + 1,05 \cdot v_{85mcp} - 0,69 \cdot p$	90,87%
ReC ₈₅ 5	$v_{85C} = 120,25 - \frac{139,68}{e^{0,0168 \cdot v_{85mcp}}} - 0,61 \cdot p$	89,37%
ReC ₈₅ 6	$v_{85C} = 86,57 - \frac{57,58}{e^{0,003 \cdot L}} - 1,02 \cdot p$	85,01%

donde: v_{85C} = Velocidad del percentil 85 de camiones cargados (km/h);
 v_{85mcp} = Velocidad del percentil 85 mínima de la curva precedente (km/h); L = Longitud de la recta (m); y p= Pendiente longitudinal (%)

La Figura 7.11 muestra la representación gráfica del modelo ReC₈₅4, el cual fue el que mejor se ajustó a los datos observados de camiones cargados en rectas. Sin embargo, se ha comprobado que en caso de no disponer de la velocidad empírica y obtener esta por medio de un modelo, el R² disminuye aproximadamente un 20%, por lo cual, en caso de no contar con la velocidad empírica es mejor utilizar el modelo ReC₈₅6.

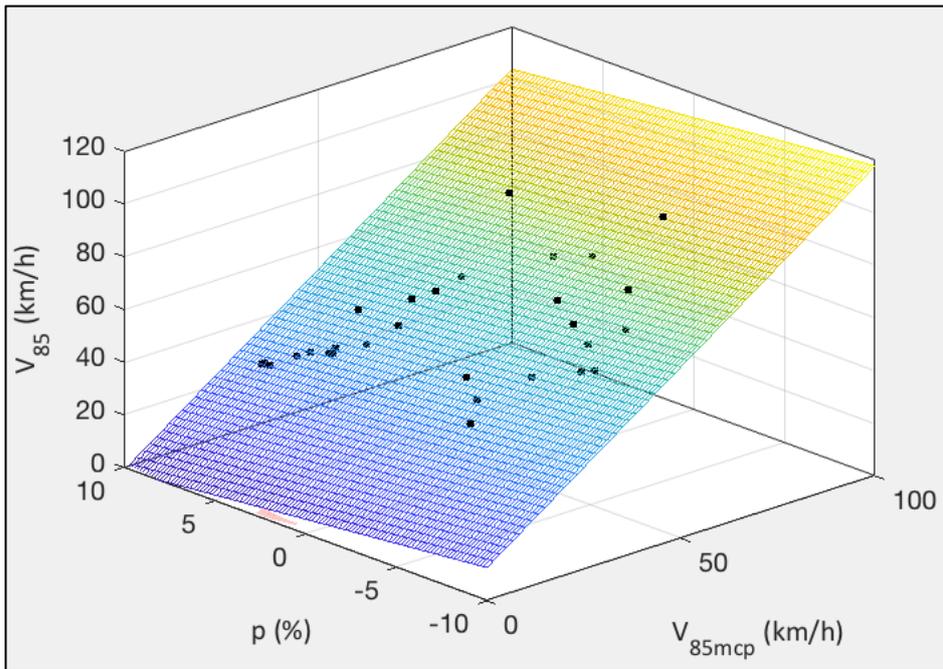


Figura 7.11 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones cargados

Para la calibración de los modelos de los camiones descargados se llevó a cabo el mismo procedimiento que para los camiones cargados. De esta forma, la Tabla 7.11 muestra los modelos que obtuvieron el mejor ajuste a partir de una variable explicativa.

Tabla 7.11 Modelos de regresión para estimar la V_{85} de camiones descargados

Modelo	Expresión	R^2
ReD ₈₅ 1	$v_{85D} = 0,81 \cdot v_{85mcp} + 19,95$	59,20%
ReD ₈₅ 2	$v_{85D} = 0,03 + 59,42 \cdot L$	61,21%
ReD ₈₅ 3	$v_{85D} = 93,71 - 41,81/e^{0,0022 \cdot L}$	69,64%

donde: v_{85D} = Velocidad del percentil 85 de camiones descargados (km/h);
 v_{85mcp} = Velocidad del percentil 85 mínima de la curva precedente (km/h); y
 L = Longitud de la recta (m)

El modelo ReD₈₅1 tiene como variable explicativa la velocidad del percentil 85 mínima de la curva precedente (Figura 7.12a), mientras los modelos ReC₈₅2 y ReC₈₅3 consideran la longitud de la recta (Figura 7.12b y Figura 7.12c).

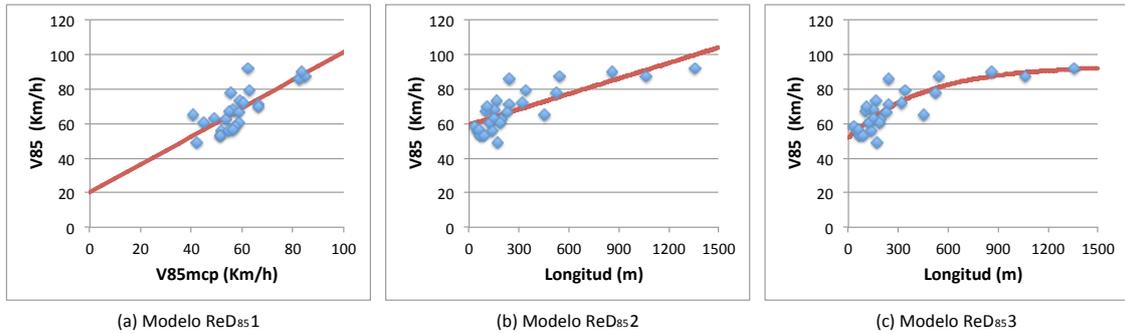


Figura 7.12 Modelos de regresión para estimar la V_{85} de camiones descargados

En la Figura 7.12a y Figura 7.12b se muestran los modelos puramente lineales, es decir, aquellos en que la variable utilizada no ha sufrido ninguna transformación. En este sentido, se observa como los dos modelos, ReD₈₅1 y ReD₈₅2, son capaces de adaptarse a los datos observados de manera similar, ya que el R^2 obtenido en ambos casos es prácticamente igual.

El modelo ReD₈₅3 fue el que mayor ajuste presentó. La Figura 7.12c muestra como la velocidad crece a medida que aumenta la longitud de la recta hasta un cierto valor de la misma a partir de la cual la velocidad permanece constante.

Con el fin de mejorar el modelo obtenido a partir de una única variable, se realizó un análisis introduciendo una segunda variable explicativa. Cabe recordar que en este caso a diferencia de los modelos calibrados anteriormente, no se incluyó la pendiente como segunda variable ya que en el análisis no encontró una influencia de esta en los camiones descargados.

De esta forma, a partir del modelo ReD₈₅3 se llevó a cabo un análisis de residuos en función de la V_{85} mínima de la curva precedente (Figura 7.13). Así, se identificó una tendencia lineal creciente entre los residuos y dicha velocidad.

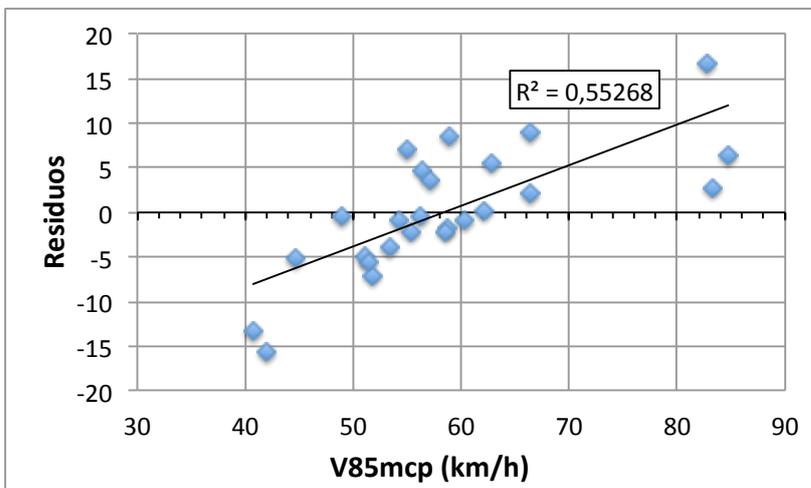


Figura 7.13 Análisis de residuos vs. V_{85mcp}

Como resultado, se calibró el modelo compuesto para camiones descargados que se muestra en la Tabla 7.12. En este se puede observar como el R^2 aumentó un 16% para el modelo $ReD_{85}4$.

Tabla 7.12 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones descargados

Modelo	Expresión	R^2
$ReD_{85}4$	$v_{85D} = 72,95 - \frac{40,54}{e^{0,0017 \cdot L}} + 0,39 \cdot v_{85mcp}$	85,94%

donde: v_{85D} = Velocidad del percentil 85 de camiones descargados (km/h); L = Longitud de la recta (m); y v_{85mcp} = Velocidad del percentil 85 mínima de la curva precedente (km/h)

La Figura 7.14 muestra la representación gráfica del modelo $ReD_{85}4$, el cual fue el que se ajustó mejor a los datos disponibles de camiones descargados en rectas.

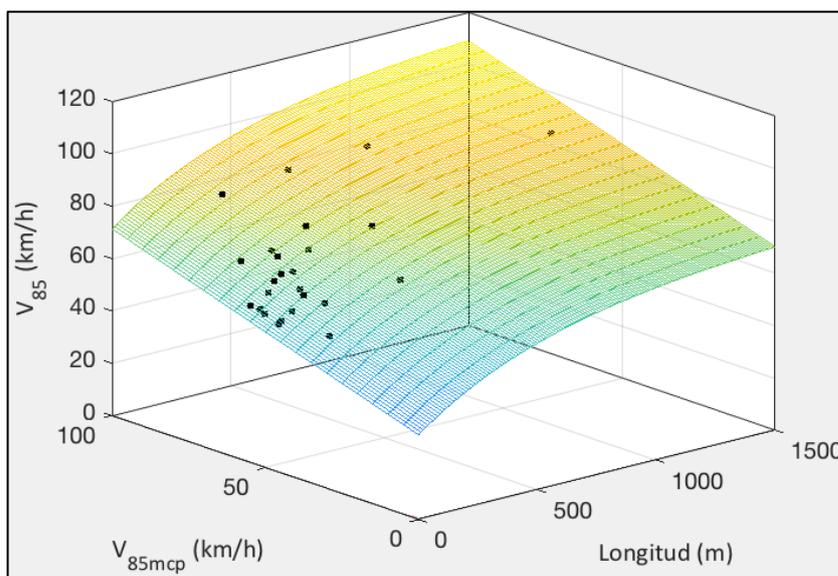


Figura 7.14 Modelo compuesto para la estimación de la V_{85} de camiones descargados

7.2.2 Modelización de la velocidad media

Para la velocidad media se siguió el mismo procedimiento que para la velocidad del percentil 85.

La Tabla 7.13 muestra los modelos que presentaron un mejor ajuste. Para camiones cargados se encontró la velocidad media mínima de la curva precedente como la variable explicativa, mientras que para los camiones descargados fue la longitud de la recta.

Tabla 7.13 Modelos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados

Modelo	Expresión	R^2
ReC _{m1}	$v_{mC} = 0,51 + 1,13 \cdot v_{mmcp}$	87,85%
ReC _{m2}	$v_{mC} = 82,33 - \frac{54,83}{e^{0,0028 \cdot L}}$	75,01%
ReD _{m1}	$v_{mD} = 87,50 - 40,80/e^{0,0022 \cdot L}$	66,07%

donde: v_{mC} = Velocidad media de camiones cargados (km/h); v_{mD} = Velocidad media de camiones descargados (km/h); v_{mmcp} = Velocidad media mínima de la curva precedente (km/h); y L = Longitud de la recta (m)

Al igual que con la velocidad del percentil 85, se introduciendo una segunda variable explicativa con el fin de mejorar los modelos.

De esta manera, se calibraron los modelos compuestos ReC_{m3} y ReC_{m4} para camiones cargados, este último, se recomienda utilizarlo en los casos que se desconoce el dato de la velocidad empírica. De igual forma se calibró el modelo ReD_{m2} para camiones descargados.

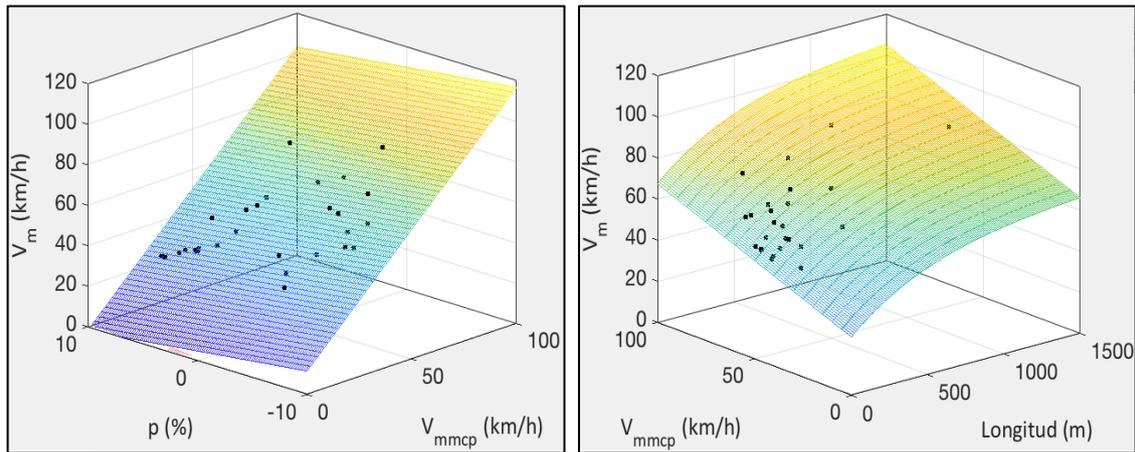
En la Tabla 7.14 se muestran los modelos, junto con su correspondiente R^2 , el cual se puede observar como el aumentó considerablemente para los modelos ReC_{m4} y ReD_{m2}.

Tabla 7.14 Modelos compuestos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados

Modelo	Expresión	R^2
ReC _{m3}	$v_{mC} = 4,76 + 1,05 \cdot v_{mmcp} - 0,68 \cdot p$	91,85%
ReC _{m4}	$v_{mC} = 82,33 - \frac{54,83}{e^{0,0028 \cdot L}} - 1,02 \cdot p$	84,01%
ReD _{m2}	$v_{mC} = 68,95 - \frac{40,54}{e^{0,0017 \cdot L}} + 0,39 \cdot v_{mmcp}$	85,72%

donde: v_{mC} = Velocidad media de camiones cargados (km/h); v_{mD} = Velocidad media de camiones descargados (km/h); v_{mmcp} = Velocidad media mínima de la curva precedente (km/h); p= Pendiente longitudinal de la recta (%); y L = Longitud de la recta (m)

La Figura 7.15 muestra la representación gráfica de los modelos ReC_{m3} y ReD_{m2}.



(a) Camiones Cargados

(b) Camiones Descargados

Figura 7.15 Modelos compuestos para la estimación de la V_m de camiones cargados y descargados en rectas

7.2.3 Modelización de la velocidad del percentil 15

Para la velocidad media se siguió el mismo procedimiento de los epígrafes anteriores. Así, se encontraron las mismas variables explicativas de la velocidad del percentil 85 y velocidad media, la velocidad media mínima de la curva precedente para camiones cargados, y la longitud de la recta para los camiones descargados.

La Tabla 7.15 muestra los modelos que presentaron un mejor ajuste.

Tabla 7.15 Modelos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados

Modelo	Expresión	R^2
ReC ₁₅ 1	$v_{15C} = 0,47 + 1,16 \cdot v_{15mcp}$	86,47%
ReC ₁₅ 2	$v_{15C} = 78,67 - \frac{52,32}{e^{0,0023 \cdot L}}$	73,45%
ReD ₁₅ 1	$v_{15D} = 80,50 - 36,53/e^{0,0021 \cdot L}$	61,99%

donde: v_{15C} = Velocidad del percentil 15 de camiones cargados (km/h); v_{15D} = Velocidad del percentil 15 de camiones descargados (km/h); v_{15mcp} = Velocidad del percentil 15 mínima de la curva precedente (km/h); y L = Longitud de la recta (m)

Con el fin de mejorar los modelos obtenidos a partir de una variable, se realizó un análisis introduciendo una segunda variable explicativa.

Así, se calibraron los modelos compuestos ReC₁₅3 y ReC₁₅4 para camiones cargados, este último, al igual que para la velocidad del percentil 85 y velocidad media se recomienda utilizarlo en los casos que se desconoce el dato de la velocidad empírica. De igual forma, se calibró el modelo ReD₁₅2 para camiones descargados.

En la Tabla 7.14 se muestran los modelos, junto con su correspondiente R^2 .

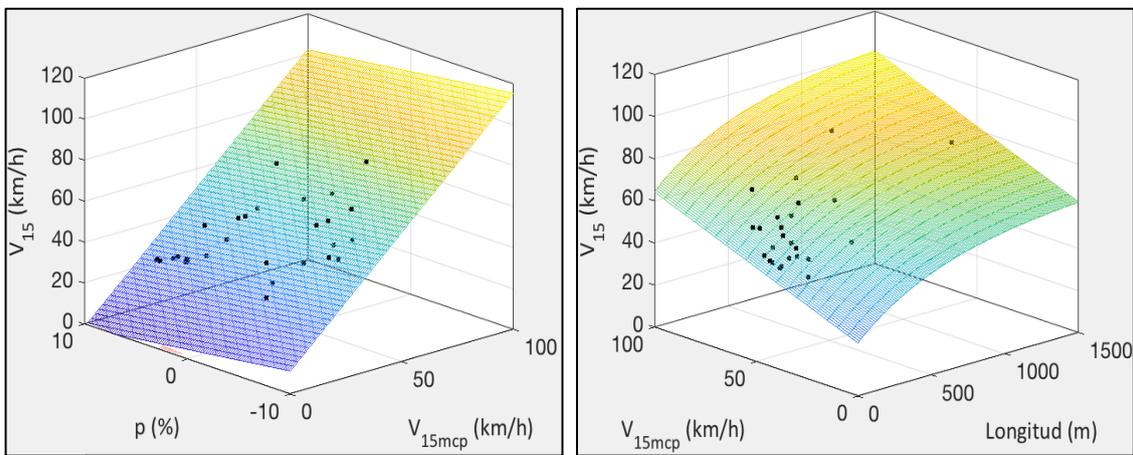
Tabla 7.16 Modelos compuestos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados

Modelo	Expresión	R^2
ReC ₁₅₃	$v_{15C} = 4,76 + 1,04 \cdot v_{15mcp} - 0,65 \cdot p$	90,95%
ReC ₁₅₄	$v_{15C} = 78,67 - \frac{52,32}{e^{0,0023 \cdot L}} - 1,07 \cdot p$	83,41%
ReD ₁₅₂	$v_{15C} = 64,85 - \frac{39,54}{e^{0,0017 \cdot L}} + 0,39 \cdot v_{15mcp}$	83,09%

donde: v_{15C} = Velocidad del percentil 15 de camiones cargados (km/h);
 v_{15D} = Velocidad del percentil 15 de camiones descargados (km/h);
 v_{15mcp} = Velocidad del percentil 15 mínima de la curva precedente (km/h);

= Pendiente longitudinal de la recta (%); y L = Longitud de la recta (m)

La Figura 7.16 muestra la representación gráfica de los modelos ReC₁₅₃ y ReD₁₅₂.



(a) Camiones Cargados

(b) Camiones Descargados

Figura 7.16 Modelos compuestos para la estimación de la V_{15} de camiones cargados y descargados en rectas

8 DISCUSIÓN

En el presente apartado se lleva a cabo una discusión de los principales resultados obtenidos, destacando aquellos en los que se comprueban o se refutan hipótesis consideradas en investigaciones anteriores.

8.1 VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN CURVAS

8.1.1 Velocidad mínima en curvas

Generalmente, la calibración de modelos para la estimación de las velocidades de operación en curvas se realiza a partir de datos de velocidad puntuales, donde habitualmente se utiliza la velocidad registrada en el punto medio de la curva, considerando que en ese punto se produce la velocidad mínima.

En este estudio, gracias a los perfiles continuos de velocidad, se demostró que la velocidad del percentil 85, media y del percentil 15 mínima no se produce en el centro de la curva, sino que los camiones adaptan su velocidad antes de llegar al punto medio de la curva.

Para ello, se realizó un estudio estadístico mediante un test de hipótesis entre datos pareados. Aunque el resultado fue que el percentil 85 de la velocidad registrada en el centro de la curva y la velocidad mínima del percentil 85 a lo largo de la curva no son estadísticamente igual, la diferencia media fue de 0,7 km/h y la mayor diferencia presentada entre dos datos específicos fue 2 km/h.

8.1.2 Rango y tamaño de la muestra en curvas

Los valores de las características geométricas de las 105 curvas seleccionadas en el presente estudio fueron comparados con los rangos de valores establecidos en la Instrucción de Carreteras Española, la Norma 3.1-I.C (2016) para carreteras del Grupo 3. De esta manera:

- El rango para los radios de curvas de carreteras del Grupo 3 que aparece en la Tabla 4.4 de la Instrucción varía entre 50 m y 350 m. Por tanto, el rango de datos empleados en la presente investigación se consideran válidos para analizar el comportamiento de los vehículos pesados en carreteras convencionales.
- En relación al ángulo de deflexión, la Instrucción dice que el desarrollo mínimo de la curva se corresponderá con una variación de azimut entre sus extremos mayor o igual que 20 gonios, pudiendo aceptarse valores entre 20 y 6 gonios, y sólo excepcionalmente valores inferiores a 6 gonios. En el caso de valores excepcionales de ángulos de deflexión, la norma establece la formulación para calcular el desarrollo mínimo de las curvas en función del ángulo girado. De igual forma, el ángulo de

deflexión entre dos alineaciones rectas consecutivas se recomienda que no sea inferior a dos gonios excepto en caso de proximidad a otras infraestructuras.

En la muestra del estudio se reflejaron los casos más habituales, pero no los casos excepcionales, que necesitarán un estudio posterior.

- Estudiando las limitaciones para las clotoides que marca la Instrucción, los valores mínimos varían entre 45 m y 135 m. En la muestra de estudio este rango quedó cubierto.

Además, se estudió la muestra, es decir, el número de curvas utilizada para la modelización de las velocidades de operación en curvas en investigaciones anteriores (Tabla 8.1).

Tabla 8.1 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en curvas

Literatura de referencia	Muestra
Al-Maseid et al. (1995)	57
Donnell et al. (2001)	11
Gibreel et al. (2001)	19
Misaghi y Hassan (2005)	40
Jacob y Anjaneyulu (2012)	152
Presente estudio	105

Como puede observarse, en las anteriores investigaciones el número de curvas estudiadas ha sido mejor a 100, a excepción del estudio de Jacob y Anjaneyulu (2012), en donde fueron 152 curvas, pero su pendiente estuvo entre el -2% y +2%.

De igual forma, se calculó el número de conductores requeridos para cada curva, el resultado arrojó que el número de conductores requeridos en la mayoría de las curvas seleccionadas era menor a 10. Esto se debió principalmente a la baja desviación típica de la velocidad, que presentó un valor medio de 1,96 km/h. No obstante, la media del número de observaciones por curva fue aproximadamente de 80 conductores.

De esta manera, el número de datos utilizados en el presente estudio para la calibración de los modelos es más amplio que los anteriores.

8.1.3 Influencia del trazado en planta

La variable más influyente en las velocidades de operación de los vehículos pesados es el radio. Este resultado fue consistente con los resultados obtenidos en investigaciones previas (Donnell et al., 2001; Jacob & Anjaneyulu, 2012; Morris & Donnell, 2014). Con respecto a esto, la influencia del radio en la

velocidad de los vehículos pesados fue diferente dependiendo de si el camión estaba cargado o no.

Para camiones descargados, el radio era dominante hasta valores de alrededor de 200 m, ya que para mayores radios el aumento de velocidad era muy bajo. Sin embargo, la influencia del radio fue mayor para los camiones cargados, ya que se identificó una gran influencia hasta un radio de 300 m. Esto se debe a que los camiones cargados presentan una mayor altura del centro de gravedad.

A pesar de que los nuevos modelos calibrados mostraron una tendencia similar que aquel propuesto por Jacob y Anjaneyulu (2012), los nuevos modelos de velocidad de operación estiman velocidades mayores que el modelo desarrollado por Jacob y Anjaneyulu (2012). Es probable que este fenómeno se deba a la diferencia entre las carreteras convencionales españolas e indias, que tienen diferentes límites de velocidad, características de los vehículos pesados y comportamiento de los conductores. Con respecto a esto, los camiones considerados en esta investigación podrían tener una relación peso/potencia más baja que los vehículos pesados considerados por Jacob y Anjaneyulu (Figura 8.1).

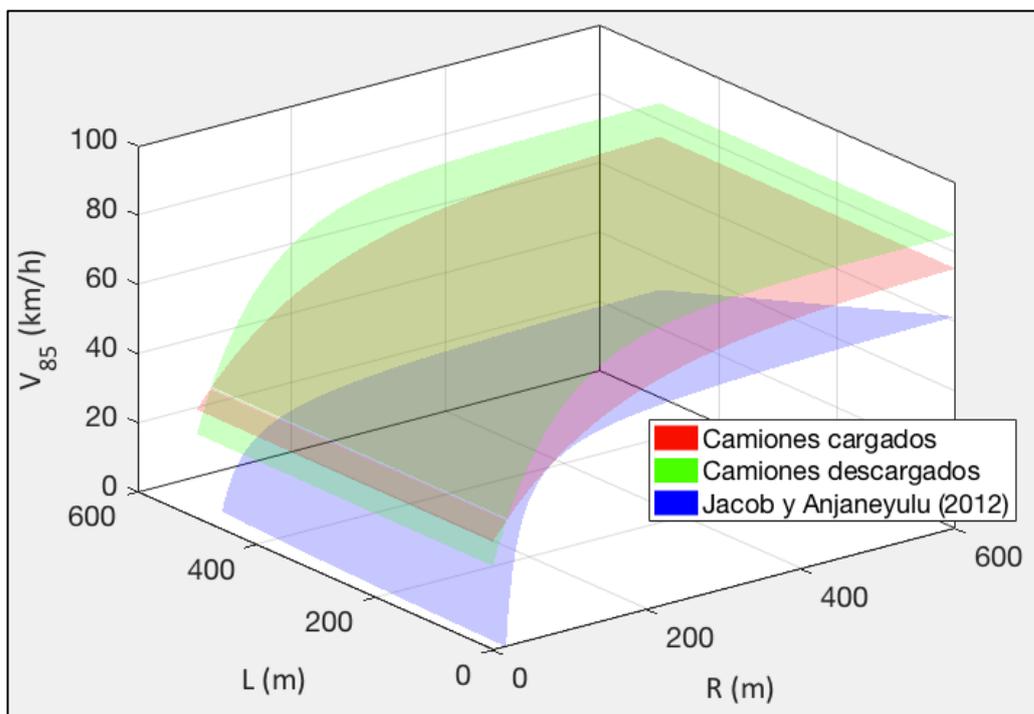


Figura 8.1 Modelos de velocidad del percentil 85 vs. modelo de Jacob y Anjaneyulu

8.1.4 Influencia del trazado en alzado

El trazado en alzado también tuvo una gran influencia en la velocidad de los vehículos pesados. Particularmente, la pendiente en el punto de curvatura

mostró una influencia significativa en la velocidad de los camiones cargados y descargados.

A pesar de que el umbral de pendiente fue menor para los camiones descargados (3%) que para los cargados (4%), la influencia de la pendiente era mayor para los cargados, ya que el coeficiente de regresión asociado a dicha variable era significativamente mayor para los camiones cargados (5,06) que para los descargados (1,95).

Además, este fenómeno también podría deberse a que el radio tenía una mayor influencia sobre los camiones cargados que los descargados. Por tanto, al introducir la pendiente como variable secundaria su influencia sobre los camiones descargados fue mayor.

Por lo anterior, la influencia la pendiente fue mayor para camiones cargados que para camiones descargados.

Otros autores señalaron que la velocidad de los vehículos pesados disminuye a medida que aumenta la pendiente, pero no a partir de un determinado valor de la pendiente (Donnell et al., 2001; Morris & Donnell, 2014). Sin duda, estas conclusiones están relacionadas con las características geométricas de las curvas bajo estudio.

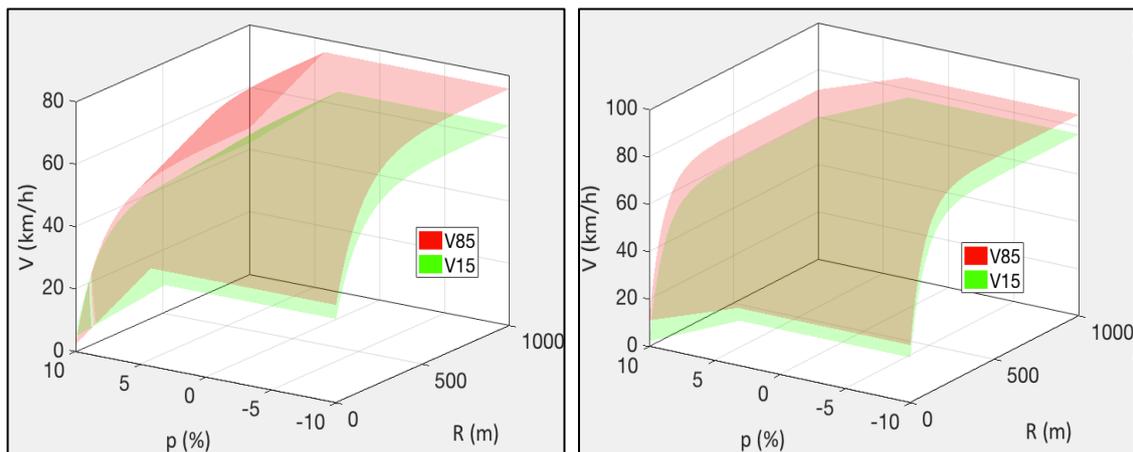
Específicamente, Morris y Donnell (2014) estudiaron las velocidades de los vehículos pesados en carreteras multicarriles, que generalmente presentan mayores radios y longitudes de recta. En esta situación, los conductores no están tan influenciados por el trazado en planta como en las carreteras convencionales de dos carriles, donde esta alineación predomina sobre el alzado. Así, el alzado presenta una mayor influencia en la velocidad de los vehículos pesados.

De acuerdo con Donnell et al. (2001), las velocidades de operación en el punto medio de la curva también están influenciadas por la longitud y la pendiente de salida. Sin embargo, este estudio ha concluido que la pendiente en el punto de curvatura influye significativamente en la velocidad de los vehículos pesados.

Finalmente, se realizó una comparación entre los modelos de velocidad de percentil 85 y 15 (Figura 8.2). La diferencia entre ambos percentiles de velocidad disminuye a medida que el radio disminuye tanto para los camiones cargados como para los descargados. Además, la diferencia entre ambos percentiles de velocidad es menor para los camiones descargados que para los cargados. Como ejemplo, esta diferencia de velocidad es de aproximadamente 8 km/h para camiones descargados considerando grandes valores del radio, mientras que esta diferencia de velocidad aumenta a 12 km/h para camiones cargados. Por lo tanto, se produce una mayor desviación de velocidad para los

camiones cargados que para los descargados, descontando los efectos del alzado.

Con respecto al alzado, se observó una tendencia diferente dependiendo de si el vehículo estaba cargado o no. Para camiones cargados, cuanto mayor sea la pendiente, menor será la diferencia entre ambos percentiles de velocidad. Por el contrario, la diferencia de velocidad aumenta a medida que aumenta la pendiente para los camiones descargados. Resumiendo, los camiones cargados presentan una desviación de velocidad más baja que los camiones descargados si solo se considera el trazado en alzado.



(a) Camiones Cargados

(b) Camiones Descargados

Figura 8.2 Comparación entre los modelos para estimar la V_{85} y V_{15} para camiones cargados y descargados en curvas

Por lo tanto, los camiones cargados están más influenciados por el trazado en alzado y los camiones descargados están más influenciados por el trazado en planta.

8.2 VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN RECTAS

8.2.1 Velocidad máxima en rectas

Como se ha visto a lo largo del estado del arte de este trabajo, los modelos para la estimación de la velocidad en rectas suelen presentar mucha menor correlación que los modelos para curvas. Esto se debe a que la estimación de las velocidades de operación en rectas es más compleja y menos precisa que en curvas debido, fundamentalmente, a que no hay una aceleración lateral que compensar, y por tanto, el riesgo de salirse de la vía no entra dentro de la elección de la velocidad por parte de los conductores.

Lo anterior hace que esta elección de la velocidad se base en otros criterios, como puede ser la sección transversal, el entorno de la vía, el tráfico existente, o la geometría general del tramo. Además, al no estar estos criterios tan

relacionados con la posibilidad de sufrir un accidente, son interpretados por los conductores de formas muy diversas, lo que conlleva a que la dispersión de las velocidades en rectas es mucho mayor que en curvas, además de que su valor promedio también es superior.

Sin embargo, en el presente estudio se obtuvieron resultados contrarios a las anteriores investigaciones. Los modelos calibrados para camiones cargados y descargados en rectas presentaron una mayor correlación que los modelos calibrados para curvas.

Esto se podría explicar debido a que los conductores mantuvieron un comportamiento similar en las rectas y en el caso de los camiones descargados circularon a velocidades cercanas a la velocidad límite de 90 km/h. De esta forma, la dispersión de las velocidades fue menor en las rectas.

En este estudio, al disponer de datos continuos de velocidad individuales para cada uno de los conductores, las velocidades de operación que fueron utilizadas para llevar a cabo el análisis y para la calibración de los modelos fue la velocidad máxima que se mantuvo constante, sin influencia de aceleración o deceleración alguna, independientemente de si se situaba en el centro de la recta o no.

8.2.2 Influencia del trazado

Las variables explicativas en los modelos de las rectas fueron diferentes para los camiones cargados y descargados. Las variables que mejor explicaron el comportamiento de los camiones cargados fueron la velocidad mínima de la curva anterior y la pendiente. En este sentido, la velocidad aumenta a medida que la pendiente disminuye y viceversa.

En el caso de los camiones descargados, las variables explicativas fueron la longitud de la recta y la velocidad mínima de la curva anterior. Cabe destacar que en el rango de datos analizados, pendientes máximas del 6%, no se encontró una influencia de la pendiente en la velocidad de los vehículos pesados descargados. Así, los camiones descargados presentaron un comportamiento similar al de los vehículos ligeros.

No obstante, cabe recordar que según el análisis realizado para las curvas, la velocidad depende del radio y la pendiente, por lo que al usar la velocidad mínima de la curva anterior en los modelos de las rectas, implícitamente se está incluyendo la pendiente de la curva anterior a la recta.

Asimismo, como se vio en el estado del arte, diferentes guías de diseño geométrico, proporcionan ábacos para estimar las tasas de aceleración y deceleración de vehículos pesados en rectas. De esta manera, La AASHTO (2011), lo hace para un único camión tipo de 120 kg/kW, a partir de una

velocidad de entrada a la recta de 110 km/h, la distancia recorrida y el valor de la pendiente longitudinal. De igual forma, la Instrucción de Carreteras Española, la Norma 3.1-I.C (2016), lo hace para un único camión tipo de 120 kg/kW, pero en este caso, a diferencia de la AASHTO (2011), la velocidad de entrada a la recta es de 100 y 80 km/h.

A pesar de que las variables de los modelos calibrados en el presente estudio y las variables de los ábacos de la AASHTO (2011) y la Norma 3.1-I.C (2016) de España, son las mismas, no se pueden comparar directamente debido a que los ábacos estiman las tasas de aceleración y deceleración, mientras que los modelos del presente estudio estiman la velocidad máxima.

De todas formas, la Figura 8.3 muestra un diferencia de 65 km/h para un vehículo de 120 kg/kW en rectas mayores a 500 m cuando la pendiente pasa del 1 al 8%. Diferencia que es apenas de 10 km/h, cuando se aplica el modelo de velocidad del percentil 85 para camiones cargados en rectas calibrado en el presente estudio.

Teniendo en cuenta que los ábacos de la Norma 3.1-I.C (2016) son tomados de la AASHTO (2011), y que estos han sido construidos a partir de investigaciones llevadas a cabo desde los años 40 hasta los años 80 (Taragin, 1945; Willey, 1949; Huff y Scrivner, 1955; Schewender y Granum, 1957; Hayhoe y Grundmann, 1978; Gillespie, 1986), la diferencia de velocidad anteriormente mencionada, se debe a las diferencias entre las características de las carreteras convencionales españolas y americanas, además de los diferentes límites de velocidad, características de los vehículos pesados y comportamiento de los conductores.

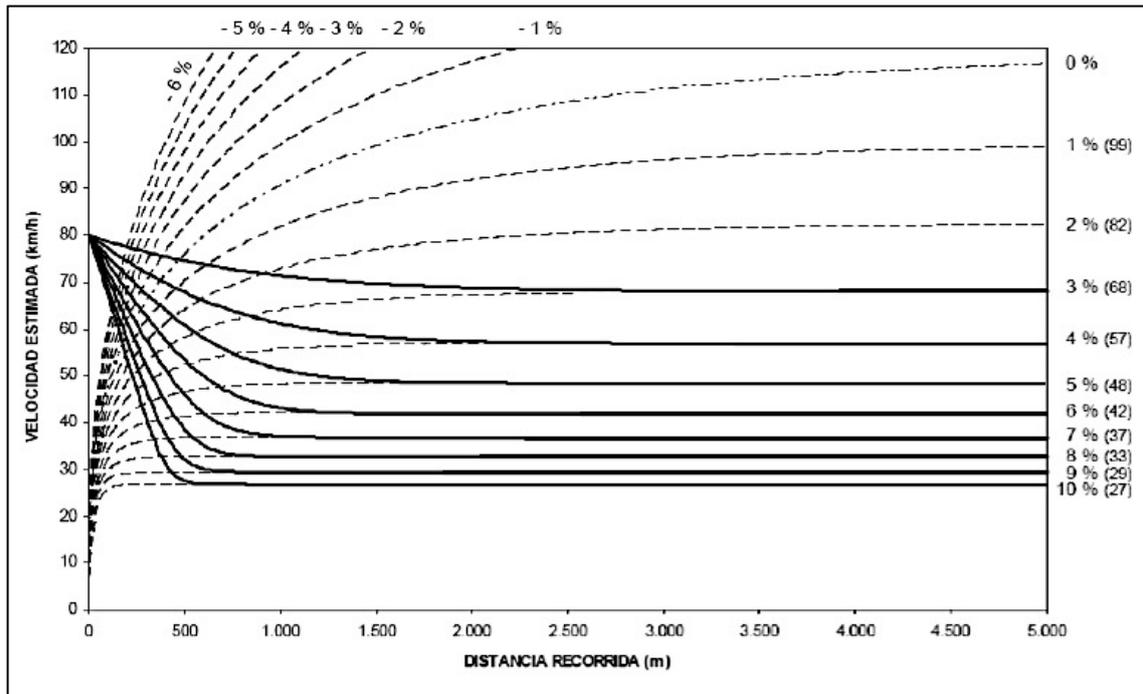


Figura 8.3 Ábaco de aceleración y deceleración para un vehículo pesado tipo 120 kg/kW desde 80 km/h (Norma 3.1-I.C, 2016)

8.2.3 Rango y tamaño de la muestra en rectas

Los valores de las características geométricas de las 59 rectas seleccionadas en el presente estudio fueron comparados con los rangos de valores establecidos en la Instrucción de Carreteras Española, la Norma 3.1-I.C (2016) para carreteras del Grupo 3, de esta manera:

- La longitud mínima establecida por el artículo 4.2.1 de la Instrucción para una velocidad de proyecto de 40 km/h es 56 m, que se corresponde con la longitud mínima de recta en curvas en “S”. Esta longitud fue superior a la longitud mínima tenida en cuenta en este estudio.
- La longitud máxima establecida por el artículo 4.2.1 de la Instrucción para una velocidad de proyecto de 90 km/h es 1.503 m. Este valor fue superior a la longitud máxima tenida en cuenta en este estudio.

Asimismo, se estudió la muestra, es decir, el número de rectas utilizadas para la modelización de las velocidades de operación en investigaciones anteriores (Tabla 8.2).

Tabla 8.2 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en rectas

Literatura de referencia	Muestra
Al-Maseid et al. (1995)	57
Donnell et al. (2001)	11
Arellano et al. (2015)	24
Boroujerdian et al. (2016)	42
Presente estudio	59

Como puede observarse, en las anteriores investigaciones el número de rectas estudiadas ha sido mejor a las 59 rectas del presente trabajo.

De igual forma, se analizó el número de conductores requeridos por recta. El resultado arrojó que el número de conductores requeridos en la mayoría de las rectas seleccionadas fue menor a 20, esto se puede explicar debido a la baja desviación típica de la velocidad. Así, la media de la desviación típica de la velocidad fue de 1,65 km/h. No obstante, la media del número de observaciones fue aproximadamente de 90 conductores por recta.

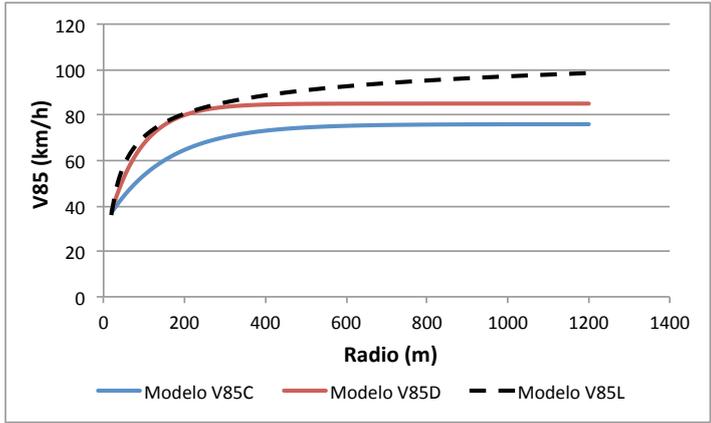
De esta manera, el número de datos utilizados en el presente estudio para la calibración de los modelos es más amplio que los anteriores.

8.3 VELOCIDAD DE VEHÍCULOS LIGEROS VERSUS VELOCIDAD DE VEHÍCULOS PESADOS

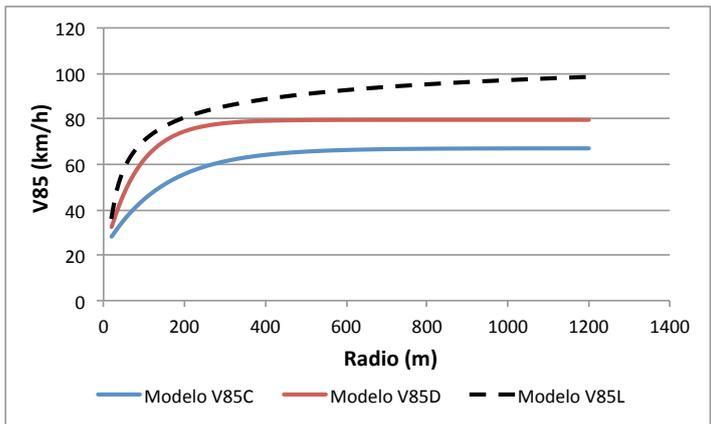
El estudio de las diferencias de velocidad de operación entre vehículos ligeros y pesados se ha extendido a las variables que influyen en su elección. La mayor parte de las investigaciones con este objetivo concluyeron que, mientras que el perfil de velocidad de los vehículos ligeros puede basarse principalmente en el trazado en planta de la carretera, el perfil de velocidad de los vehículos pesados depende en gran medida también del trazado en alzado.

En el presente estudio se ha comprobado que, efectivamente, el trazado en alzado tiene una importante influencia sobre la velocidad desarrollada por los vehículos pesados y, especialmente, sobre los camiones cargados. Por lo anterior, los modelos calibrados para la estimación de la velocidad desarrollada por vehículos ligeros no son válidos para vehículos pesados.

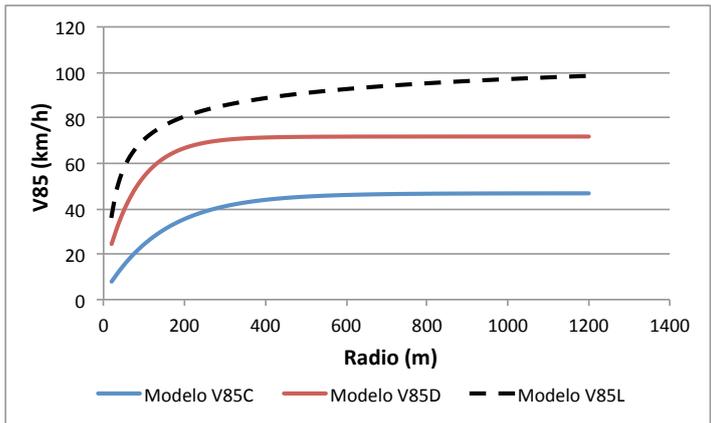
De esta manera, los modelos calibrados para la estimación de la velocidad del percentil 85 de camiones cargados (V_{85C}) y descargados (V_{85D}), se ha comparado con los modelos para la estimación de la velocidad de operación de vehículos ligeros (V_{85L}) de García-Jiménez (2017) para curvas y rectas (Figura 8.4 y Figura 8.5).



(a) Pendiente <3%



(b) Pendiente =6%



(c) Pendiente =10%

Figura 8.4 V_{85C} y V_{85D} vs. V_{85L} en curvas

La Figura 8.4a muestra la comparación para una pendiente menor al 3%. En ella se observa como la velocidad de los camiones descargados es igual a la desarrollada por los vehículos ligeros para radios de curva hasta 200 m, punto a partir del cual se empieza a ampliar la diferencia entre ambas velocidades llegando a ser de aproximadamente 15 km/h en radios mayores a 1000 m. Respecto a los camiones cargados, la diferencia es de 20 km/h sin importar cuál sea el radio de la curva.

Por otra parte, a medida que aumenta la pendiente la diferencia de velocidad entre los vehículos ligeros y pesados aumenta. Así, para una pendiente del 6% y radios amplios, la diferencia entre ligeros y pesados es de 20 km/h para camiones descargados y 25 km/h para camiones descargados. Para una pendiente del 10%, esta diferencia asciende a 25 km/h para descargados y a 50 km/h para cargados (Figura 8.4b y Figura 8.4c).

La Figura 8.5 muestra la comparación entre camiones descargados y vehículos ligeros en rectas. En ella se observa cómo cuanto menor es la velocidad de la curva precedente, menor es la diferencia entre los dos tipos de vehículos. Esta diferencia también aumenta a medida que la longitud de la recta disminuye. Esto se debe principalmente a las características propias de los vehículos, ya que los ligeros son capaces de acelerar más rápidamente que los camiones.

Como se ha visto a lo largo del desarrollo del presente estudio, las velocidades de operación de los camiones cargados es menor a los descargados, por lo que se puede atribuir las misma conclusiones para los cargados.

Por último, cabe destacar que la velocidad de los vehículos pesados es mayor a la velocidad de los ligeros para la combinación de velocidades bajas de la curva anterior y longitudes elevadas de recta (Figura 8.5). Esto se debe a que los modelos no están calibrados para este tipo de combinación, el cual difícilmente se encuentra en la práctica.

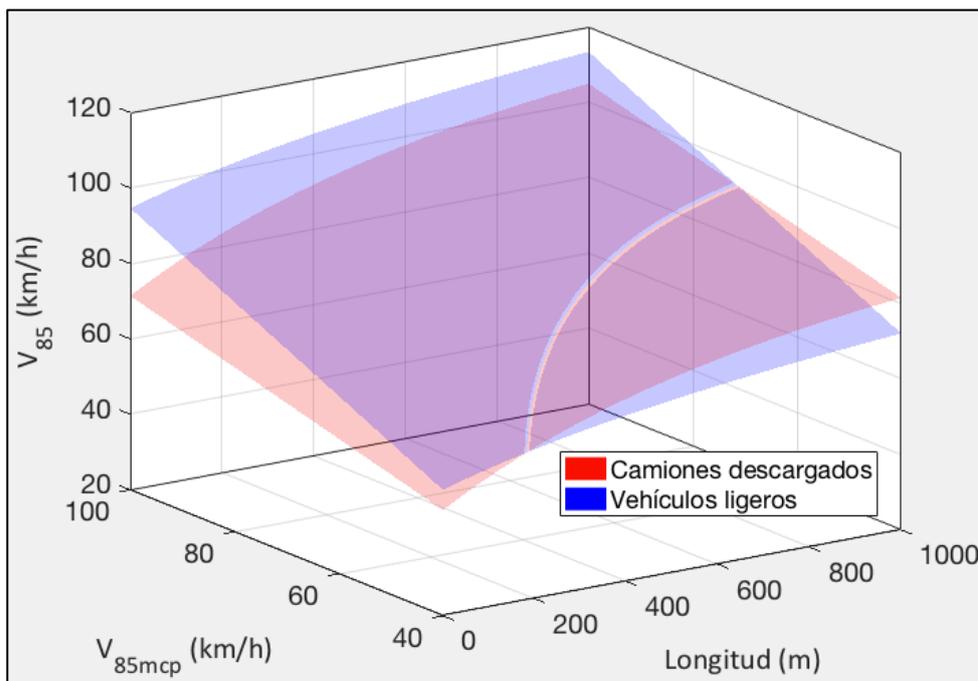


Figura 8.5 V_{85D} vs. V_{85L} en rectas

9 CONCLUSIONES

El principal objetivo de este trabajo de investigación ha sido el desarrollo de modelos para la estimación de la velocidad del percentil 85, media y percentil 15 en curvas y rectas de carreteras convencionales para vehículos pesados. Esto se llevó a cabo analizando la relación entre las características geométricas de su trazado en planta y alzado y los perfiles continuos de velocidad observados a través de dispositivos GPS

La primera fase del análisis se centró en el estudio descriptivo de las variables que influían en el comportamiento de los conductores en curvas y rectas. Para ello, se consideraron diferentes variables geométricas, índices de trazado y variables operacionales.

De esta forma, dos diferentes tendencias fueron identificadas, las cuales estaban relacionadas con los camiones cargados y descargados. Los vehículos utilizados en este estudio eran de cinco ejes con remolque tanto tipo bañera como semirremolque, con una relación peso/potencia entre 35 y 54 kg/kW para camiones descargados, con una media de 43 kg/kW, y un valor máximo de 120 kg/kW para camiones cargados.

Tras el análisis descriptivo se calibraron diferentes modelos de regresión considerando aquellas variables que habían presentado una mayor correlación con la velocidad del percentil 85, media y del percentil 15 en curvas y rectas de carreteras convencionales para camiones cargados y descargados.

Los modelos para curvas fueron desarrollados a partir de la observación de la velocidad en un total de 105 curvas y estiman la velocidad mínima en este tipo de elemento geométrico.

Las ecuaciones 5 y 6 definen los modelos para el cálculo de la velocidad del percentil 85 de camiones cargados y descargados en curvas, con un R² de 74 y 78% respectivamente.

$$V_{85C} = \begin{cases} 75,96 - \frac{44,56}{e^{0,00685 \cdot R}} & \text{Si } p \leq 4,23\% \\ 75,96 - \frac{44,56}{e^{0,00685 \cdot R}} - 5,06 \cdot (p - 4,23) & \text{Si } p > 4,23\% \end{cases} \quad (5)$$

$$V_{85D} = \begin{cases} 85,02 - \frac{60,62}{e^{0,0124 \cdot R}} & \text{Si } p \leq 3,19\% \\ 85,02 - \frac{60,62}{e^{0,0124 \cdot R}} - 1,95 \cdot (p - 3,19) & \text{Si } p > 3,19\% \end{cases} \quad (6)$$

Donde:

v_{85C} = Velocidad de operación de camiones cargados (km/h)

v_{85D} = Velocidad de operación de camiones descargados (km/h)

R = Radio de la curva (m)

p= Pendiente en el punto de curvatura (%)

Las ecuaciones 7 y 8 definen los modelos para el cálculo de la velocidad media de camiones cargados y descargados en curvas, con un R² de 74 y 78% respectivamente.

$$V_{mC} = \begin{cases} 69,50 - \frac{40,29}{e^{0,0071R}} & \text{Si } p \leq 4,18\% \\ 69,50 - \frac{40,29}{e^{0,0071 \cdot R}} - 4,84 \cdot (p - 4,18) & \text{Si } p > 4,18\% \end{cases} \quad (7)$$

$$V_{mD} = \begin{cases} 81,98 - \frac{59,96}{e^{0,0116R}} & \text{Si } p \leq 3,06\% \\ 81,98 - \frac{59,96}{e^{0,0116 \cdot R}} - 2,43 \cdot (p - 3,06) & \text{Si } p > 3,06\% \end{cases} \quad (8)$$

Donde:

v_{mC} = Velocidad media de camiones cargados (km/h)

v_{mD} = Velocidad media de camiones descargados (km/h)

R = Radio de la curva (m)

p= Pendiente en el punto de curvatura (%)

Las ecuaciones 9 y 10 definen los modelos para el cálculo de la velocidad del percentil 15 de camiones cargados y descargados en curvas, con un R² de 72 y 75% respectivamente.

$$V_{15C} = \begin{cases} 64,17 - \frac{37,23}{e^{0,0072R}} & \text{Si } p \leq 3,14\% \\ 64,17 - \frac{37,23}{e^{0,0072 \cdot R}} - 3,28 \cdot (p - 3,14) & \text{Si } p > 3,14\% \end{cases} \quad (9)$$

$$V_{15D} = \begin{cases} 76,74 - \frac{57,58}{e^{0,0118R}} & \text{Si } p \leq 3,06\% \\ 76,74 - \frac{57,58}{e^{0,0118 \cdot R}} - 2,43 \cdot (p - 3,06) & \text{Si } p > 3,06\% \end{cases} \quad (10)$$

Donde:

v_{15C} = Velocidad del percentil 15 de camiones cargados (km/h)

v_{15D} = Velocidad del percentil 15 de camiones descargados (km/h)

R = Radio de la curva (m)

p= Pendiente en el punto de curvatura (%)

Los modelos para rectas fueron calibrados a partir de la observación de la velocidad en un total de 59 rectas y son capaces de estimar la velocidad máxima en este tipo de elemento geométrico.

Las ecuaciones 11, 12 y 13 definen los modelos para el cálculo de la velocidad del percentil 85 de camiones cargados y descargados en rectas, con un R² de 91, 85% y 86% respectivamente.

$$v_{85C} = 5,70 + 1,05 \cdot v_{85mcp} - 0,69 \cdot p \quad (11)$$

$$v_{85C} = 86,57 - \frac{57,58}{e^{0,003 \cdot L}} - 1,02 \cdot p \quad (12)$$

$$v_{85D} = 72,95 - \frac{40,54}{e^{0,0017 \cdot L}} + 0,39 \cdot v_{85mcp} \quad (13)$$

Donde:

v_{85C} = Velocidad del percentil 85 de camiones cargados (km/h)

v_{85D} = Velocidad del percentil 85 de camiones descargados (km/h)

v_{85mcp} = Velocidad del percentil 85 mínima de la curva precedente (km/h)

L = Longitud de la recta (m)

p= Pendiente longitudinal (%)

Las ecuaciones 14, 15 y 16 definen los modelos para el cálculo de la velocidad media de camiones cargados y descargados en rectas, con un R² de 92, 84 y 86% respectivamente.

$$v_{mC} = 4,79 - 1,05 \cdot v_{mmcp} - 0,68 \cdot p \quad (14)$$

$$v_{mC} = 82,33 - \frac{54,83}{e^{0,0028 \cdot L}} - 1,02 \cdot p \quad (15)$$

$$v_{mD} = 68,95 - \frac{40,54}{e^{0,0017 \cdot L}} + 0,39 \cdot v_{mmcp} \quad (16)$$

Donde:

v_{mC} = Velocidad media de camiones cargados (km/h)

v_{mD} = Velocidad media de camiones descargados (km/h)

v_{mmcp} = Velocidad media mínima de la curva precedente (km/h)

L = Longitud de la recta (m)

p= Pendiente longitudinal (%)

Finalmente, las ecuaciones 17, 18 y 19 definen los modelos para el cálculo de la velocidad del percentil 15 de camiones cargados y descargados en rectas, con un R² de 91, 84 y 83% respectivamente.

$$v_{15C} = 4,76 - 1,04 \cdot v_{15mcp} - 0,65 \cdot p \quad (17)$$

$$v_{15C} = 78,67 - \frac{52,32}{e^{0,0023 \cdot L}} - 1,07 \cdot p \quad (18)$$

$$v_{15D} = 64,85 - \frac{39,54}{e^{0,0017 \cdot L}} + 0,39 \cdot v_{15mcp} \quad (19)$$

Donde:

v_{15C} = Velocidad del percentil 15 de camiones cargados (km/h)

v_{15D} = Velocidad del percentil 15 de camiones descargados (km/h)

v_{15mcp} = Velocidad del percentil 15 mínima de la curva precedente (km/h)

p= Pendiente longitudinal de la recta (%)

L = Longitud de la recta (m)

Como se ha dicho anteriormente, estos modelos se han calibrado a partir de datos obtenidos en 12 secciones de carreteras convencionales ubicados en la Comunidad Valenciana. Por tanto, la aplicación de los modelos está limitada a este tipo de carreteras, es decir, carreteras de dos carriles con un carril por sentido de circulación, con un ancho de carril entre 3,0 y 3,5 m y arcén entre 1,0 y 1,5 m. Además, el uso de los modelos en otros países o regiones debe realizarse con especial cautela debido a las diferentes características de los vehículos pesados, conductores y velocidad límite (en este caso 90 km/h) entre países.

También hay que considerar que la totalidad de las curvas estudiadas presentaron clotoides adyacentes, aunque algunas sean de una longitud reducida. Por tanto, los modelos calibrados pueden no ajustarse con demasiada precisión a las curvas sin clotoides adyacentes.

Durante el proceso de calibración, se detectó una falta de datos en determinados rangos de valores de las características geométricas utilizadas. Así, el número de curvas con radio superior a 300 metros se reduce a 3 para camiones cargados y 8 para camiones descargados. En rectas con longitud superior a 400 metros los datos se reducen a 5 para camiones cargados y 6 para camiones descargados. De igual forma las pendientes máximas en rectas para camiones descargados es del 6%. Por tanto, este estudio debe completarse con una muestra mayor de geometrías de estas características.

De igual forma, el análisis de los perfiles continuos de velocidad, tanto individuales como de operación, ha permitido verificar o refutar las hipótesis definidas en esta investigación:

- En estudios anteriores, la caracterización de la velocidad en curvas para la calibración de modelos para su estimación se ha realizado según diferentes parámetros, ante la imposibilidad de definir la velocidad mínima en curvas al utilizar únicamente datos puntuales de velocidad. En la presente investigación se ha realizado un estudio de la velocidad en curvas circulares, concluyendo que la velocidad mínima y la velocidad en el centro de la curva no son estadísticamente iguales. No obstante, la diferencia media fue de 0,7 km/h y la mayor diferencia presentada entre dos datos específicos fue 2 km/h (Hipótesis 1 rechazada).
- La relación peso/potencia tiene una gran influencia en las velocidades de operación de los vehículos pesados. En este sentido, se identificaron

dos tendencias, una para camiones cargados y otra para camiones descargados. La relación peso/potencia para camiones descargados presentó valores entre 35 y 54 kg/kW, con una media de 43 kg/kW, y para camiones cargados alcanzó un valor máximo de 120 kg/kW (Hipótesis 2, 3 y 6 aceptadas).

- La variable más influyente en las velocidades de los vehículos pesados en curvas fue el radio. Este resultado fue consistente con los resultados obtenidos en investigaciones previas (Donnell et al., 2001; Jacob & Anjaneyulu, 2012; Morris & Donnell, 2014). Con respecto a esto, la influencia del radio en la velocidad de los vehículos pesados fue diferente dependiendo de si el camión estaba cargado o no. Para camiones descargados, el radio era dominante hasta valores de alrededor de 200 m, ya que para mayores radios el aumento de velocidad era muy bajo. Sin embargo, la influencia del radio fue mayor para los camiones cargados, ya que se identificó una gran influencia hasta un radio de 300 m. Esto se debe a que los camiones cargados presentan una mayor altura del centro de gravedad (Hipótesis 4 aceptada).
- El alzado también tuvo una gran influencia en la velocidad de los vehículos pesados en curvas. Aunque otros autores señalaron que la velocidad de los vehículos pesados disminuye a medida que aumenta la pendiente, no habían señalado a partir de qué valor. Además, se encontró que la pendiente en el punto de curvatura es la que mayor influencia significativa tiene en la velocidad de los camiones cargados y descargados. A pesar de que el umbral de pendiente fue menor para los camiones descargados (3%) que para los cargados (4%), la influencia de la pendiente era mayor para los cargados, ya que el coeficiente de regresión asociado a dicha variable era significativamente mayor para los camiones cargados (5,06) que para los descargados (1,95) (Hipótesis 2 y 5 aceptadas).
- En curvas, para una pendiente menor al 3%, la velocidad de los camiones descargados es igual a la desarrollada por los vehículos ligeros para radios de curva hasta 200m, punto a partir del cual se empieza a marcar diferencia, llegando a ser de aproximadamente 15 km/h en radios mayores a 1000 m. Respecto a los camiones cargados, se encontró una diferencia de 20 km/h sin importar cuál es el radio de la curva. De igual forma, a medida que aumenta la pendiente la diferencia de velocidad entre los vehículos ligeros y pesados aumenta. Así, para una pendiente del 6% y radios grandes, la diferencia entre ligeros y camiones descargados, llegó a ser de 20 km/h y con camiones descargados de 25 km/h. Para una pendiente del 10%, la diferencia fue de 25 km/h para descargados y de 50 (Hipótesis 2 y 5 aceptadas).
- Las variables explicativas de los modelos de predicción de la velocidad en rectas fueron diferentes para los camiones cargados y descargados.

Así, las variables que mejor explicaron el comportamiento de los camiones cargados fueron la velocidad mínima de la curva anterior y la pendiente. En este sentido, la velocidad aumenta a medida que la pendiente disminuye y viceversa (Hipótesis 2 y 5 aceptadas).

- En el caso de los camiones descargados, no se identificó una influencia significativa de la pendiente en sus velocidades para el rango de datos analizados (pendientes máximas del 6%). En este caso, las variables explicativas fueron la longitud de la recta y la velocidad mínima de la curva anterior. Así, en los camiones descargados se observó un comportamiento similar al de los vehículos ligeros (Hipótesis 2, 3 y 5 aceptadas).
- En rectas, entre menor sea la velocidad de la curva precedente, menor es la diferencia entre los vehículos pesados y vehículos ligeros. De igual forma, entre menor sea la longitud de la recta, mayor es la diferencia, esto se explica por la características propias de los vehículos, ya que los ligeros tienen la capacidad de acelerar más rápido que los camiones (Hipótesis 2, 3 y 6 aceptadas).
- En el presente estudio se obtuvo resultados contrarios a las anteriores investigaciones con respecto a los valores de los índices de bondad de ajuste obtenidos. Los modelos calibrados para camiones cargados y descargados en rectas presentaron una mayor correlación que los modelos calibrados para curvas. Esto se podría explicar debido a que los conductores mantuvieron un comportamiento muy similar en las rectas, alcanzando valores cercanos a la velocidad límite (90 km/h), por lo que la dispersión de las velocidades fue menor que en curvas (Hipótesis 7 rechazada).

Los perfiles continuos de velocidad recogidos en esta investigación se pueden utilizar para desarrollar y analizar las transiciones de velocidad recta-curva a través de las tasas de aceleración y desaceleración. Esto permitirá completar el modelo de perfil de velocidad de operación de vehículos pesados.

Por último, cabe destacar que el desarrollo y modelización de la velocidad de vehículos pesados en curvas presentado en este Trabajo Final de Máster ha sido publicado en el congreso internacional "*Transportation Research Board 97th Annual Meeting*" y se encuentra en revisión para ser publicado en la revista indexada "*Transportation Research Record*".

10 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación pueden convertirse en una herramienta fundamental para el estudio de la seguridad vial tanto de trazados en fase de diseño como de carreteras ya existentes. Sin embargo, como se ha citado a lo largo del presente trabajo de investigación, hay ámbitos tratados en el mismo que precisan investigaciones complementarias para una mejor caracterización de la velocidad desarrollada por los vehículos pesados.

De esta manera, se proponen las siguientes líneas de investigación:

1. Durante el proceso de calibración, se ha observado una falta de datos en determinados rangos de valores de las características geométricas utilizadas. Así, el número de curvas con radio superior a 300 metros se reduce a 3 para camiones cargados y 8 para camiones descargados. En rectas con longitud superior a 400 metros los datos se reducen a 5 para camiones cargados y 6 para camiones descargados. De igual forma las pendientes máximas en rectas para camiones descargados fue del 6%. Por tanto, sería interesante llevar a cabo un estudio complementario con una muestra mayor de geometrías de estas características.
2. En este estudio no se analizaron acuerdos cóncavos y convexos con pendiente descendente a la entrada y pendiente descendente a la salida o viceversa, por lo que se requiere realizar una investigación en profundidad sobre el comportamiento de los vehículos pesados en este tipo de acuerdos en curvas y rectas para complementar el análisis.
3. Los perfiles de velocidad continua recogidos en esta investigación se pueden utilizar para desarrollar y analizar las variaciones de velocidad en la transición recta-curva. Esto permitirá el desarrollo de modelos de aceleración y deceleración para completar el modelo de perfil de velocidad de operación de vehículos pesados. De esta manera, además se podría analizar las tasas de aceleración y deceleración de pesados en rectas y comparar estas con los ábacos propuestos por la AASHTO (2011) y la Norma 3.1 I.C. de España (2016). En estas guías se define las aceleraciones y deceleraciones en rectas teniendo en cuenta la distancia recorrida y el valor de la pendiente para diferentes valores de la relación peso/potencia.
4. Este trabajo se ha centrado en el análisis de las velocidades de operación de camiones pesados de cinco ejes. Futuras investigaciones podrían estudiar el comportamiento de otro tipo de vehículos pesados como camiones ligeros y autobuses.
5. Como se ha comprobado en la presente investigación, la velocidad desarrollada por vehículos ligeros y pesados es diferente, asimismo,

hasta ahora los modelos para la consistencia en el diseño son con base al comportamiento de los vehículos ligeros, en futuros estudios, la inclusión de los vehículos pesados en la consistencia del diseño es una tarea pendiente.

6. En este estudio se ha analizado el comportamiento de los vehículos pesados en las carreteras convencionales porque en ellas se producen la mayor parte de los accidentes, pero también sería recomendable analizar otro tipo de vías, como las carreteras multicarril y autovías de velocidad de diseño reducida, que cada vez tiene mayor número de kilómetros y de vehículos en el territorio español.

AGRADECIMIENTOS

El presente Trabajo Final de Master ha sido desarrollado en el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), perteneciente al Instituto del Transporte y Territorio de la Universitat Politècnica de València, por ende, agradecimientos especiales al Prof. Dr. Alfredo García García, a la Prof. Dra. Ana María Pérez Zuriaga, al Doctorando David Llopis Castelló, y al Prof. Dr. Javier Camacho Torregrosa por sus valiosos aportes durante la elaboración del presente trabajo.

También al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España y el Fondo Social Europeo por la subvención al proyecto de investigación “CASEFU – Estudio experimental de la funcionalidad y seguridad de las carreteras convencionales” (TRA2013-42578-P), ya que sin su apoyo no habría sido posible el proceso de obtención de datos.

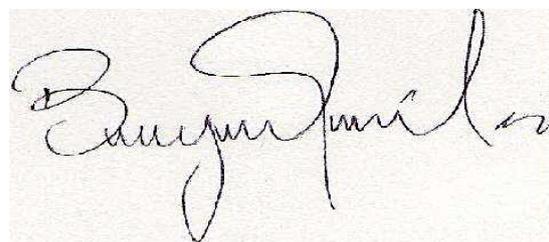
Finalmente, agradecer al Prof. Manuel López Porta por su gestión para la toma de datos con las empresas Agricultores de la Vega de Valencia (SAV) S.L., Saevi S.L. y Abonos Orgánicos Montagut (AOM) S.L., y a estas, por su colaboración desinteresada.

CONCLUSIÓN

El presente Trabajo Final de Máster se divide en tres partes claramente diferenciadas. La primera hace referencia a la revisión bibliográfica, que se centra en los distintos conceptos de velocidad, la seguridad vial y los métodos y modelos más representativos de velocidades de operación, tanto para vehículos ligeros como para vehículos pesados. La segunda parte consta de la definición de los objetivos e hipótesis y la presentación de la metodología. En estos capítulos se explica el alcance de la investigación y se establecen los fundamentos para el posterior análisis. Finalmente, la tercera parte se caracteriza por la definición de los nuevos modelos para estimar las velocidades de operación de vehículos pesados. Asimismo, se indican diferentes líneas de investigación relacionadas con el presente estudio, donde es posible y recomendable una investigación más profunda.

Por tanto, los objetivos marcados por el presente Trabajo Final del Máster en Transporte, Territorio y Urbanismo han sido todos alcanzados satisfactoriamente, de esta manera, finaliza el presente estudio dedicado al desarrollo de modelos para la estimación de la velocidad de operación de vehículos pesados en carreteras convencionales a partir de datos naturalísticos, enmarcado como Trabajo Final de Máster del alumno Brayan Duwan González Hernández.

Valencia, a 2 de febrero de 2018



Fdo: Brayan Duwan González Hernández

REFERENCIAS

- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). A policy on geometric design of highway and streets. AASHTO, Washington, DC, 2004.
- Adolini-Minnicino, M. & Elefteriadou, L. Speed prediction models for trucks on two-lane rural highways. *In Transportation 83rd Annual Meeting Research Board*, Washington, DC, 2004.
- Al-Masaeid, H. R., Hamed, M., Aboul-Ela, M., & Ghannam, A. G. Consistency of horizontal alignment for different vehicle classes. *Transportation Research Record*, 1995, 1500, pp. 178-183.
- Anderson, I., Bauer, K., Harwood, D., & Fitzpatrick, K. Relationship to safety of geometric design consistency measures for rural two-lane highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1999, (1658), 43-51.
- Arellano, D., Echaveguren, T. & Vargas-Tejeda, S. A model of truck speed profiles on short upward slopes. *Transport*, 2015, vol. 168, pp. 475-483.
- Bella, F. Effects of combined curves on driver's speed behavior: driving simulator study. *Transportation Research Procedia*, 2014, Vol. 3, pp. 100-108.
- Bester, C. Truck speed profiles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2000, no 1701, p. 111-115.
- Camacho - Torregrosa, F. J., Pérez - Zuriaga, A. M., Campoy - Ungría, J. M., García, A., & Tarko, A. P. Use of Heading Direction for Recreating the Horizontal Alignment of an Existing Road. *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2015, vol. 30, no 4, p. 282-299.
- Castro, M., Pardillo-Mayora, J.M. y Jurado, R. Development of a local operating speed model for consistency analysis integrating laser, GPS and GIS for measuring vehicles speed. *Baltic Journal of Road and Bridge Eng.*, 2013, Vol 8, N. 4, pp. 281-288.
- Donnell, E., Ni, Y., Adolini, M., & Elefteriadou, L. Speed prediction models for trucks on two-lane rural highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001, no 1751, p. 44-55.
- Echaveguren, T., & Carrasco, D. Estimación de longitud crítica en pendientes ascendentes en caminos bidireccionales. *Revista ingeniería de construcción*, 2015, vol. 30, no 1, p. 5-16.

- García-Jiménez, M.E., Desarrollo de modelos de velocidad de operación de vehículos ligeros en carreteras convencionales, considerando sus características geométricas y operacionales, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2017.
- Gillespie, T. *Methods for Predicting Truck Speed Loss on Grades. FHWA/RD.* Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, McLean, VA, 1986.
- Gibreel, G. M., Easa, S. M., & El-Dimeery, I. A. Prediction of operating speed on three-dimensional highway alignments. *Journal of Transportation Engineering*, 2001, vol. 127, no 1, p. 21-30.
- Harwood, D. W. *Review of truck characteristics as factors in roadway design* (Vol. 505). Transportation Research Board, 2003.
- Hassan, Y. Traffic and speed characteristics on two-lane highways: field study. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003, 30(6), pp. 1042-1054.
- Hassan, Y., Sarham, M., Dimaiuta, M., Donnell, E., Himes, S., Porter, R., Psarianos, B., García, A., Perco, P. y Taylor, M. Modeling operating speed: synthesis report. Transportation Research Circular number E-C151. Transportation Research Board, 2011.
- Hayhoe, G. F. and Grundmann, J. G. *Review of Vehicle Weight/Horsepower Ratio as Related to Passing Lane Design Criteria.* Final Report of NCHRP Project 20-7(10). Pennsylvania State University, University Park, PA, 1978.
- Huff, T. S. and Scrivner, F. H. Simplified Climbing-Lane Design Theory and Road-Test Results. *Bulletin 104.* Highway Research Board, Washington, DC, 1955, p. 1-11.
- Jacob, A., & Anjaneyulu, M. V. L. R. Operating speed of different classes of vehicles at horizontal curves on two-lane rural highways. *Journal of Transportation Engineering*, 2012, vol. 139, no 3, p. 287-294.
- Lan, C. J., & Menendez, M. Truck speed profile models for critical length of grade. *Journal of Transportation Engineering*, 2003, vol. 129, no 4, p. 408-419.
- Lamm, R., Choueiri E. M., y Hayward J. C. Tangent as an independent design element. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1988, Vol. 1195, pp. 123–131.
- Leisch, J. E., & Leisch, J. P. New concepts in design-speed application. *Transportation Research Record*, 1977, vol. 631, p. 4-14.

- McFadden, J., y Elefteriadou, L. Formulation and validation of operating speed-based models using bootstrapping. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1997, Vol. 1579, pp. 97–103.
- Misaghi, P., & Hassan, Y. Modeling operating speed and speed differential on two-lane rural roads. *Journal of Transportation Engineering*, 2005, vol. 131, no 6, p. 408-418.
- Morris, C. M., & Donnell, E. T. Passenger car and truck operating speed models on multilane highways with combinations of horizontal curves and steep grades. *Journal of Transportation Engineering*, 2014, vol. 140, no 11.
- Ottesen, J. L., y Krammes, R. A. Speed-profile model for a design-consistency evaluation procedure in the United States. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2000, Vol. 1701, pp. 76-85.
- Pérez-Zuriaga, A.M., García, A., Torregrosa, F., & D'Attoma, P. Modeling operating speed and deceleration on two-lane rural roads with global positioning system data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, no 2171, p. 11-20.
- Pérez-Zuriaga, A. M. Caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales a partir de la observación naturalística de La evolución de vehículos ligeros, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2012.
- Pérez-Zuriaga, A. M., F. J. Camacho-Torregrosa, A. García, and J. M. Campoy-Ungría. Application of global positioning system and questionnaires data for the study of driver behaviour on two-lane rural roads. *IET Intelligent Transport Systems*, 2013, vol. 7, no 2, p. 182-189.
- Rakha, H., & Yu, B. Truck performance curves reflective of truck and pavement characteristics. *Journal of Transportation Engineering*, 2004, vol. 130, no 6, p. 753-767.
- Saifizul, A. A., Yamanaka, H., & Karim, M. R. Empirical analysis of gross vehicle weight and free flow speed and consideration on its relation with differential speed limit. *Accident Analysis & Prevention*, 2011, vol. 43, no 3, p. 1068-1073.
- Schwender, H. C., O. K. Normann, and J. O. Granum. New Method of Capacity Determination for Rural Roads in Mountainous Terrain. In *Highway Research Board Bulletin 167*. Highway Research Board, Washington, DC, 1957, p. 10-37.

Taragin, A. Effect of Length of Grade on Speed of Motor Vehicles. *Proceedings HRB*, Vol. 25, Highway Research Board, Washington, DC, 1945, p. 342-353.

Western Highway Institute. *Offtracking Characteristics of Trucks and Truck Combinations*. Research Committee Report No. 3. Western Highway Institute, San Francisco, CA, 1970.

WHO. *Global status report on road safety 2015*. World Health Organization, 2015.