

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA E
INFRAESTRUCTURAS DE LOS TRANSPORTES**



**CARACTERIZACIÓN Y MODELIZACIÓN DE LA VELOCIDAD
DE OPERACIÓN EN CARRETERAS CONVENCIONALES A
PARTIR DE LA OBSERVACIÓN NATURALÍSTICA DE LA
EVOLUCIÓN DE VEHÍCULOS LIGEROS**

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

ANA MARÍA PÉREZ ZURIAGA

Dirigida por:

Prof. Doctor ALFREDO GARCÍA GARCÍA

JUNIO 2012

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación ha sido parcialmente subvencionada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento de España, dentro del proyecto REVEL-Una metodología para la REVisión de los límites de VELOCIDAD, liderado por el Dr. Alessandro Rocci Boccaleri. Esta investigación ha sido posible también gracias a la Conselleria de Infraestructuras y Transporte de la Generalitat Valenciana, al Área de Carreteras de la Diputación de Valencia y a la Dirección General de Tráfico del Ministerio del Interior por su colaboración en la toma de datos.

Son muchas las personas que de una u otra manera han hecho posible la realización de esta tesis. Quiero expresar a todas ellas mi más sincero agradecimiento.

Por no ser sólo un director de tesis sino una guía a seguir en mi carrera docente e investigadora, quiero dar las gracias al Dr. Alfredo García García. Muchas gracias Alfredo por todo lo que me has enseñado. Espero seguir trabajando a tu lado muchos años.

Agradecer también la ayuda a todos los que forman o han formado parte del Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras, sobre todo a aquellos con los que he compartido el frío, el calor, el viento y la lluvia en la carretera, pero también muchas risas. Especialmente, quiero agradecer a Francisco Javier Camacho Torregrosa, por haberme ayudado en prácticamente todas las etapas de esta tesis y tener preparada siempre una macro casi antes de que se la pidiera. No eres un compañero, eres un gran amigo.

Finalmente, quiero agradecer y dedicar esta Tesis Doctoral a las personas más importantes de mi vida, mi familia.

A mis padres porque lo han dado todo para que mi hermana y yo seamos lo que somos. Nunca podré agradecer ni devolverles todo lo que han hecho por nosotras. Tenemos mucha suerte de tenerlos como padres. Muchísimas gracias por todo.

A mi hermana que me ha apoyado siempre en todo y me ha dado la fuerza que a veces me faltaba, creyendo más en mí que yo misma. Aunque a veces nos peleemos o estemos a miles de kilómetros, sé que siempre estaremos juntas.

A mi tío Chimo, casi mi hermano mayor, sin él creo que no habría llegado hasta aquí. A mis tíos, Natalia y Dámaso, y a mi prima, por darme todo su apoyo. A mis abuelos, a los que están y a los que se fueron, espero que estén orgullosos de su nieta.

A Víctor, la persona que está a mi lado pase lo que pase, que me hace ser feliz cada día, que me lo ha dado siempre todo y que nunca ha dejado de confiar en mí. Sé que juntos llegaremos a dónde queramos.

RESUMEN

Los tres principales factores concurrentes de la siniestralidad son: el conductor, el vehículo y la infraestructura. Este último es el causante, en mayor o menor medida, del 30 % de los accidentes en carretera. Una de las principales razones relacionadas con la infraestructura es la baja consistencia del diseño geométrico, que 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.

Los criterios más utilizados para la determinación de la consistencia están basados en la evaluación del perfil de velocidad de operación, identificada como el percentil 85 de la distribución de velocidades de vehículos circulando en condiciones de flujo libre en un tramo de carretera. Esta variable puede obtenerse a partir de mediciones durante la fase de explotación de una carretera. Sin embargo, tanto en la fase de planeamiento como en la de proyecto, únicamente puede estimarse. Para ello, se utilizan los modelos de estimación de la velocidad de operación a partir de las características geométricas del trazado de la carretera. En el presente trabajo de investigación, se han calibrado diferentes modelos que, mediante una serie de reglas de construcción, permiten la estimación del perfil continuo de velocidad de operación en un tramo de carretera convencional, a partir de sus características geométricas.

Para ello, se ha desarrollado una nueva metodología de toma de datos. Esta metodología se basa en los datos registrados mediante dispositivos GPS instalados en vehículos de conductores ajenos a la investigación. Los resultados de la toma de datos consisten en los perfiles continuos de velocidad de operación individuales de cada conductor y en su trayectoria. Su tratamiento permite la restitución de la geometría del trazado de la carretera y la obtención del perfil continuo de velocidad de operación asociado a la misma, además de los perfiles individuales.

Con ello, además de la calibración de los modelos que permiten la estimación del perfil continuo de velocidad de operación, se ha estudiado la distribución de la velocidad en secciones rectas y curvas, y se ha realizado un análisis en profundidad de los fenómenos de cambio de velocidad que se producen en las transiciones recta-curva y curva-recta.

Estos modelos son aplicables al estudio de la seguridad vial, tanto en nuevos trazados, antes de adoptar las soluciones definitivas, evaluando de esta forma la consistencia del trazado, como en carreteras en servicio. Así, se consigue una herramienta para la evaluación de uno de los factores concurrentes, como es la infraestructura.

Sin embargo, también es importante considerar en el estudio los otros dos factores, es decir, el factor humano y el vehículo. Considerando la dificultad del estudio de la influencia de estos factores en la seguridad vial, se ha abordado este estudio relacionando las características de los conductores, del viaje que realiza y del tipo de vehículo que conduce con las velocidades en rectas y curvas y las tasas de deceleración y aceleración desarrolladas. De este estudio se han obtenido conclusiones que pueden servir de base para el diseño de programas de educación y campañas de concienciación en materia de seguridad vial.

RESUM

Els tres principals factors concurrents de la sinistralitat són: el conductor, el vehicle i la infraestructura. Aquest últim és el causant, en major o menor mesura, del 30 % dels accidents en carretera. Una de les principals raons relacionades amb la infraestructura és la baixa consistència del disseny geomètric, que produeix que la geometria de la via no s'ajuste a les expectatives dels conductors i, per tant, que aquestos puguin veure's sorpresos davant de certes configuracions de la mateixa, donant com a resultat un increment en el nombre d'accidents.

Els criteris més utilitzats per a la determinació de la consistència estan basats en l'avaluació del perfil de velocitat d'operació, identificada com el percentil 85 de la distribució de velocitats de vehicles circulant en condicions de flux lliure en un tram de carretera. Esta variable pot obtindre's a partir de mesuraments durant la fase d'explotació d'una carretera. No obstant això, tant en la fase de planejament com en la de projecte, únicament pot estimar-se. Per a això, s'utilitzen els models d'estimació de la velocitat d'operació a partir de característiques geomètriques del traçat de la carretera. En el present treball d'investigació, s'han calibrat diferents models que, per mitjà d'una sèrie de regles de construcció, permeten l'estimació del perfil continu de velocitat d'operació en un tram de carretera convencional, a partir de les seues característiques geomètriques.

Per a això, s'ha desenvolupat una nova metodologia de presa de dades. Aquesta metodologia es basa en les dades registrats per mitjà de dispositius GPS instal·lats en vehicles de conductors aliens a la investigació. Els resultats de la presa de dades consisteixen en els perfils continus de velocitat d'operació individuals de cada conductor i en la seua trajectòria. El seu tractament permet la restitució de la geometria del traçat de la carretera i l'obtenció del perfil continu de velocitat d'operació associat a la mateixa, a més dels perfils individuals.

Amb això, a més de la calibratge dels models que permeten l'estimació del perfil continu de velocitat d'operació, s'ha estudiat la distribució de la velocitat en seccions rectes i corbes, i s'ha realitzat una anàlisi en profunditat dels fenòmens de canvi de velocitat que es produeixen en les transicions recta-corba i corba-recta.

Estos models són aplicables a l'estudi de la seguretat viària, tant en nous traçats, abans d'adoptar les solucions definitives, avaluant d'esta manera la consistència del traçat, com en carreteres en servici. Així, s'aconsegueix una ferramenta per a l'avaluació d'un dels factors concurrents, com és la infraestructura.

No obstant això, també és important considerar en l'estudi els altres dos factors, és a dir, el factor humà i el vehicle. Considerant la dificultat de l'estudi de la influència d'estos factors en la seguretat viària, s'ha abordat este estudi relacionant les característiques dels conductors, del viatge que realitza i del tipus de vehicle que condueix amb les velocitats en rectes i corbes i les taxes de desceleració i d'acceleració desenvolupades. D'este estudi s'han obtingut conclusions que poden servir de base per al disseny de programes d'educació i campanyes de conscienciació en matèria de seguretat viària.

ABSTRACT

The main concurrent factors on road safety are: the driver, the vehicle and the infrastructure. Infrastructure factor is present in the 30 % of accidents in rural roads. One of the main reasons related to this factor is the low consistency of road geometric design. That produces that road alignment doesn't fit drivers' expectations. Thus, number of accidents may be increased.

For road design consistency evaluation, the most used criteria are based on the evaluation of operating speed profile. Operating speed is defined as the 85th percentile of speed distribution developed by vehicles driving in free flow conditions along a road segment. This variable may be obtained by means of data collection during road operation phase. However, during planning and design phases, it only can be estimated by models as a function of road design geometric characteristics. In this research work, different models have been calibrated. The combination of those models, by means of construction rules, allows the estimation of continuous operating speed profile of a two-lane rural road segment, as a function of its alignment.

A new data collection methodology has been developed. It is based on data recorded by GPS devices placed on the vehicles of drivers who don't know the research objectives. Data collection results include drivers' individual continuous operating speed profiles and their trajectories. Data treatment allows the restitution of road alignment and the corresponding continuous operating speed profile.

Besides of the calibration of models for the estimation of continuous operating speed profile, speed distributions on curve and tangent sections have been studied. Speed variation phenomena on tangent-to-curve-to-tangent transitions have also been deeply studied.

The calibrated models may be used on road safety evaluation, not only during planning and design phase before choosing final solution, but also during operation phase. This way, it becomes on a key tool for the evaluation of one of the most important concurrent factor: infrastructure.

However, it is also important to include in the study the other two factors: human factor and vehicle. This study has been carried out focusing on the relationships between the characteristics of driver, its trip and its vehicle type, and the developed speeds on tangent and curves sections and deceleration and acceleration rates.

This study has provided conclusions that may be used as the base of the design of education programs and awareness media campaigns related to road safety.

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ANTECEDENTES.....	5
3.	ESTADO DEL ARTE	7
3.1.	Metodologías de toma de datos	8
3.1.1.	Toma de datos para restitución de la geometría de la vía.....	8
3.1.1.1.	Imágenes de satélite de alta resolución.....	8
3.1.1.2.	Utilización de datos procedentes de GPS.....	9
3.1.2.	Toma de datos relacionados con factor humano y vehículo.....	12
3.1.3.	Toma de datos de velocidades.....	13
3.1.3.1.	Toma de datos puntuales.....	14
3.1.3.2.	Toma de datos continuos.....	16
3.2.	La velocidad. Conceptos generales	18
3.2.1.	Velocidad de diseño	18
3.2.2.	Velocidad de proyecto	20
3.2.3.	Velocidad de operación	22
3.2.4.	Velocidad específica.....	22
3.2.5.	Velocidad de diseño inferida	23
3.2.6.	Velocidad límite	23
3.2.7.	Velocidad deseada	24
3.3.	La velocidad de operación	25
3.3.1.	Distribución de la velocidad de operación	25
3.3.2.	Variables condicionantes de la velocidad de operación	27
3.3.2.1.	Factores externos a la vía.....	27
3.3.2.2.	Factores internos de la vía.....	32
3.4.	La velocidad de operación y el factor humano y el vehículo	37
3.4.1.	La evaluación del riesgo asumido y los estilos de conducción mediante cuestionarios y autoinformes.....	38
3.4.2.	La velocidad como medida del riesgo asumido y los estilos de conducción	41
3.5.	La velocidad de operación y la geometría de la carretera.....	46

3.5.1.	Modelización de la velocidad de operación en curvas.....	47
3.5.1.1.	Variables condicionantes	48
3.5.1.2.	Modelos para la estimación de velocidad de operación en curvas	52
3.5.2.	Modelización de la velocidad de operación en rectas	60
3.5.2.1.	Variables condicionantes	61
3.5.2.2.	Modelos para la estimación de velocidad de operación en rectas	63
3.5.3.	Modelización de las variaciones de velocidad en las transiciones recta- curva.....	67
3.5.4.	Modelización de las tasas de deceleración y aceleración	71
3.5.5.	Perfiles de velocidad de operación.....	76
3.5.5.1.	Modelo suizo.....	76
3.5.5.2.	Modelo de Rocci (1993).....	76
3.5.5.3.	Modelo de Ottesen y Krammes (2000)	86
3.5.5.4.	Modelo de Fitzpatrick y Collins (2000)	90
3.5.5.5.	Modelo de Easa (2003).....	96
3.5.5.6.	Modelo de Crisman et al. (2005).....	105
3.5.5.7.	Modelo de Polus (2004).....	105
3.5.5.8.	Modelo de Dell'Acqua y Russo (2010).....	106
3.5.6.	Modelos avanzados.....	106
3.5.6.1.	Modelos mediante redes neuronales	107
3.5.6.2.	Aplicación al IHSDM	107
3.6.	Evaluación de los estudios analizados.....	112
3.6.1.	Evaluación de los métodos utilizados en la restitución de la geometría	112
3.6.2.	Evaluación de los estudios relacionados con el factor humano y el vehículo	113
3.6.3.	Deficiencias de los modelos de estimación de velocidad de operación en función de la geometría	114
3.6.3.1.	Deficiencias relacionadas con la toma de datos	114
3.6.3.2.	Hipótesis no realistas sobre el comportamiento de los conductores	116

3.6.3.3.	Estimación de los cambios de velocidad entre elementos geométricos	117
3.6.3.4.	Falta de uniformidad entre los modelos	117
3.6.3.5.	Escasez de modelos con la consideración de los vehículos pesados	118
3.6.3.6.	Limitaciones de la regresión lineal	118
3.6.3.7.	Aplicabilidad limitada de los modelos	119
4.	OBJETIVOS	123
4.1.	Objetivo principal.....	123
4.2.	Objetivos específicos	123
5.	HIPÓTESIS	125
6.	MÉTODO.....	127
6.1.	Toma de datos	127
6.1.1.	Pruebas experimentales iniciales	128
6.1.2.	Diseño experimental.....	132
6.1.2.1.	Procedimiento experimental.....	133
6.1.2.2.	Medios empleados en la toma de datos.....	134
6.1.2.3.	Características básicas de los tramos de carretera de toma de datos	137
6.1.2.4.	Prueba piloto.....	138
6.2.	Tratamiento de los datos.....	139
6.2.1.	Tratamiento de los datos de las encuestas	139
6.2.2.	Tratamiento de los datos procedentes de los GPS	140
6.2.2.1.	Depuración y tratamiento de los datos.....	140
6.2.2.2.	Desarrollo de una aplicación informática	142
6.3.	Análisis.....	142
6.3.1.	Estudio de la relación entre las variables	143
6.3.2.	Desarrollo de los modelos para la estimación del perfil continuo de velocidad de operación.....	144
6.3.3.	Estudio de la influencia de las características del conductor, del viaje y del tipo de vehículo.....	146
7.	DESARROLLO	149
7.1.	Toma de datos	149

7.1.1.	Trabajos previos a las jornadas de toma de datos	149
7.1.2.	Prueba piloto	150
7.1.2.1.	Jornada de toma de datos CV-245 [Glorieta Casinos – Alcublas]	150
7.1.2.2.	Jornada de toma de datos CV-245 [Alcublas – Altura]	158
7.1.2.3.	Resultados de la comprobación del carácter naturalístico de la toma de datos	163
7.1.2.4.	Modificaciones del diseño experimental tras la prueba piloto	170
7.1.3.	Campaña de toma de datos	172
7.1.3.1.	Localización y características de los tramos de estudio.....	172
7.1.3.2.	Desarrollo de la toma de datos	174
7.1.4.	Trabajos posteriores a las jornadas de toma de datos	175
7.2.	Tratamiento de datos	177
7.2.1.	Tratamiento de los datos de las encuestas	177
7.2.2.	Tratamiento de los datos procedentes de los GPS	180
7.2.2.1.	Depuración inicial de los datos brutos de los GPS	180
7.2.2.2.	Transformación de coordenadas	181
7.2.2.3.	Obtención de las trayectorias individuales	182
7.2.2.4.	Restitución de la geometría en planta.....	185
7.2.2.5.	Restitución de la geometría en alzado	235
7.2.2.6.	Cálculo de los perfiles continuos de velocidad.....	236
7.3.	Análisis.....	240
7.3.1.	Análisis de la velocidad en secciones curva.....	240
7.3.1.1.	Secciones curva a estudiar	240
7.3.1.2.	Variables consideradas en el estudio de la velocidad en curvas	244
7.3.1.3.	Distribución de la velocidad en secciones curva	247
7.3.1.4.	Modelización de la media de la velocidad en secciones curva ..	251
7.3.1.5.	Modelización de la desviación típica de la velocidad en secciones curva	256
7.3.1.6.	Modelización de la V_{85} en secciones curva.....	259
7.3.1.7.	Estudio de la velocidad elegida por los conductores en secciones curva	273

7.3.1.8.	Estudio de la velocidad desarrollada por los conductores en secciones curva	279
7.3.2.	Análisis de la velocidad en secciones recta	282
7.3.2.1.	Secciones recta a estudiar.....	283
7.3.2.2.	Variables consideradas en el estudio de la velocidad en rectas	287
7.3.2.3.	Distribución de la velocidad en secciones recta.....	290
7.3.2.4.	Modelización de la media de la velocidad en secciones recta ...	293
7.3.2.5.	Modelización de la desviación típica de la velocidad en secciones recta	297
7.3.2.6.	Modelización de la V_{85} en secciones recta	300
7.3.2.7.	Estudio de la velocidad elegida por los conductores en secciones recta.....	312
7.3.2.8.	Estudio de la velocidad desarrollada por los conductores en secciones recta	316
7.3.3.	Análisis de los diferenciales de velocidad en las transiciones recta–curva.....	319
7.3.3.1.	Secciones recta–curva a estudiar	320
7.3.3.2.	Variables consideradas en el estudio de las variaciones de velocidad en las transiciones recta-curva	322
7.3.3.3.	Modelización de los diferenciales de velocidad en las transiciones recta-curva	324
7.3.3.4.	Estudio de la deceleración	328
7.3.3.5.	Estudio de la tasa de deceleración elegida por los conductores	337
7.3.3.6.	Estudio de la tasa de deceleración desarrollada por los conductores	340
7.3.4.	Análisis de los diferenciales de velocidad en las transiciones curva–recta	343
7.3.4.1.	Secciones curva-recta a estudiar.....	344
7.3.4.2.	Variables consideradas en el estudio de las variaciones de velocidad en las transiciones curva-recta	346
7.3.4.3.	Estudio de la aceleración.....	348
7.3.4.4.	Estudio de la tasa de aceleración elegida por los conductores..	353
7.3.4.5.	Estudio de la tasa de aceleración desarrollada por los conductores	357

7.4.	Perfil continuo de velocidad de operación para la evaluación de la consistencia	360
7.4.1.	Modelos utilizados	360
7.4.1.1.	Estimación de la velocidad en curvas	360
7.4.1.2.	Estimación de la velocidad en rectas	361
7.4.1.3.	Estimación de la tasa de deceleración	363
7.4.1.4.	Estimación de la tasa de aceleración	364
7.4.2.	Reglas de construcción del modelo continuo de perfil de velocidad de operación en carreteras convencionales	365
7.5.	Validación del modelo para la estimación del perfil continuo de velocidad de operación en carreteras convencionales	371
7.5.1.	Resultados del análisis visual	372
7.5.2.	Análisis del comportamiento del modelo en curvas circulares	374
7.5.3.	Análisis del comportamiento del modelo en curvas de transición	377
7.5.4.	Análisis del comportamiento del modelo en rectas	379
8.	DISCUSIÓN	381
8.1.	La distribución de la velocidad en curvas vs la distribución de la velocidad en rectas	382
8.2.	La velocidad de operación en las curvas circulares	383
8.3.	La importancia de las curvas de transición	384
8.4.	La deceleración y la aceleración	387
8.5.	La influencia de la pendiente	389
8.5.1.	La influencia de la pendiente en la velocidad de operación en curvas	389
8.5.2.	La influencia de la pendiente en la velocidad de operación en rectas	391
8.5.3.	La influencia de la pendiente en los diferenciales de velocidad en las transiciones recta-curva	392
8.5.4.	La influencia de la pendiente en los diferenciales de velocidad en las transiciones curva-recta	394
8.6.	Rango de validez del modelo propuesto	396
8.7.	La velocidad y la deceleración/aceleración como medida del riesgo asumido y de los estilos de conducción	398

8.8.	La influencia del estilo de conducción en el diseño geométrico de carreteras.....	400
9.	APLICACIONES PRÁCTICAS.....	403
9.1.	Aplicación de la restitución de la geometría del trazado	403
9.2.	Aplicación del modelo para la estimación del perfil de velocidad de operación	403
9.3.	Aplicación de la caracterización de la velocidad desarrollada por los conductores.....	404
10.	APLICACIONES METODOLÓGICAS.....	407
10.1.	Aplicación de la metodología para la restitución de la geometría de un tramo de carretera.....	407
10.2.	Aplicación de la metodología de toma de datos de velocidad.....	407
10.3.	Recomendaciones para el posicionamiento de dispositivos de toma de datos puntual de velocidad.....	408
11.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	413
12.	CONCLUSIONES.....	417
13.	APORTACIONES	427
13.1.	RESULTADOS DE LA TESIS	427
13.2.	APORTACIONES METODOLÓGICAS	431

REFERENCIAS

ANEXOS

Anexo I: Tríptico entregado a los conductores.

Anexo II: Discurso y preguntas realizadas a los conductores.

Anexo III: Estadillos de recogida de datos de encuestas.

Anexo IV: Descripción completa de las jornadas de toma de datos.

A.IV.1 Jornada de toma de datos 1: CV-35 [Tuéjar – Titaguas]

A.IV.2 Jornada de toma de datos 2: CV-35 [Calles – Losa del Obispo]

A.IV.3 Jornada de toma de datos 3: CV-333 [Urb. Brugar – Urb. Pedravilla]

A.IV.4 Jornada de toma de datos 4: CV-50 [Cheste - Villamarchante]

A.IV.5 Jornada de toma de datos 5: CV-372 [La Pobla de Vallbona – Ribarroja del Turia]

A.IV.6 Jornada de toma de datos 6: CV-305 [CV-315 (Rutas) – CV-310 (Náquera)]

A.IV.7 Jornada de toma de datos 7: CV-370 [Villamarchante - Pedralba]

A.IV.8 Jornada de toma de datos 8: CV-401 [Alfajar – Carretera del Saler]

A.IV.9 Jornada de toma de datos 9: CV-376 [Pedralba - Llíria]

A.IV.10 Jornada de toma de datos 10: CV-310 [Bétera - Náquera]

Anexo V: Caracterización geométrica de los tramos estudiados.

A.V.1 Jornada de toma de datos 1: CV-35 [Tuéjar – Titaguas]

A.V.2 Jornada de toma de datos 2: CV-35 [Calles– Losa del Obispo]

A.V.3 Jornada de toma de datos 3: CV-333 [Urb. Brugar – Urb. Pedravilla]

A.V.4 Jornada de toma de datos 4: CV-50 [Cheste - Villamarchante]

A.V.5 Jornada de toma de datos 5: CV-372 [La Pobla de Vallbona – Ribarroja del Turia]

A.V.6 Jornada de toma de datos 6: CV-305 [CV-315 (Rutas) – CV-310 (Náquera)]

A.V.7 Jornada de toma de datos 7: CV-370 [Villamarchante - Pedralba]

A.V.8 Jornada de toma de datos 8: CV-401 [Alfajar – Carretera del Saler]

A.V.9 Jornada de toma de datos 9: CV-376 [Pedralba - Llíria]

A.V.10 Jornada de toma de datos 10: CV-310 [Bétera - Náquera]

Anexo VI: Perfiles continuos de velocidad de los tramos de estudio.

A.VI.1 Jornada de toma de datos 1: CV-35 [Tuéjar – Titaguas]

A.VI.2 Jornada de toma de datos 2: CV-35 [Calles– Losa del Obispo]

A.VI.3 Jornada de toma de datos 3: CV-333 [Urb. Brugar – Urb. Pedravilla]

A.VI.4 Jornada de toma de datos 4: CV-50 [Cheste - Villamarchante]

A.VI.5 Jornada de toma de datos 5: CV-372 [La Pobla de Vallbona – Ribarroja del Turia]

A.VI.6 Jornada de toma de datos 6: CV-305 [CV-315 (Rutas) – CV-310 (Náquera)]

A.VI.7 Jornada de toma de datos 7: CV-370 [Villamarchante - Pedralba]

A.VI.8 Jornada de toma de datos 8: CV-401 [Alfajar – Carretera del Saler]

A.VI.9 Jornada de toma de datos 9: CV-376 [Pedralba - Lliria]

A.VI.10 Jornada de toma de datos 10: CV-310 [Bétera - Náquera]

Anexo VII: Características geométricas de las curvas estudiadas.

Anexo VIII: La velocidad en las curvas.

A.VIII.1 Distribución de la velocidad en las curvas estudiadas

A.VIII.1.1 Representación gráfica de la distribución de la velocidad en las curvas estudiadas

A.VIII.1.2 Características de la distribución de la velocidad en las curvas estudiadas

A.VIII.2 Influencia de las variables geométricas en la velocidad en curvas

Anexo IX: Características geométricas de las rectas estudiadas.

Anexo X: La velocidad en las rectas.

A.X.1 Distribución de la velocidad en las rectas estudiadas

A.X.1.1 Representación gráfica de la distribución de la velocidad en las rectas estudiadas

A.X.1.2 Características de la distribución de la velocidad en las rectas estudiadas

A.X.2 Influencia de las variables geométricas en la velocidad en rectas

Anexo XI: Características geométricas de las transiciones recta-curva estudiadas.

Anexo XII: La velocidad en las transiciones recta-curva.

A.XII.1 Influencia de las variables geométricas en el decremento de la velocidad

A.XII.2 Influencia de las variables geométricas en la tasa de deceleración

Anexo XIII: Características geométricas de las transiciones curva-recta estudiadas.

Anexo XIV: La velocidad en las transiciones curva-recta.

Anexo XV: Perfiles de velocidad de operación estimados vs perfiles de velocidad de operación empíricos.

Anexo XVI: Publicaciones relacionadas con el trabajo de investigación.

A.XVI.1 Publicaciones directamente relacionadas

A.XVI.1.1 Revistas

A.XVI.1.2 Congresos nacionales

A.XVI.1.3 Congresos internacionales

A.XVI.1.4 Libros

A.XVI.2 Otras publicaciones relacionadas

A.XVI.2.1 Congresos nacionales

A.XVI.2.2 Congresos internacionales

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Localización de los dispositivos de medida en curva horizontal	14
Figura 3.2 Disposición de toma de datos para el estudio de deceleración/aceleración	15
Figura 3.3 Ejemplo del método alemán para dividir una vía en tramos homogéneos	32
Figura 3.4 Características geométricas de la curva horizontal.....	35
Figura 3.5 Relación entre velocidad, radio y peralte ($f=0.25$).....	79
Figura 3.6 Esquema de obtención de las velocidades de operación en rectas, Rocci (1993).....	84
Figura 3.7 Gráfico de ajuste por aceleración desde la curva anterior (Rocci, 1993)	85
Figura 3.8 Gráfico de ajuste por deceleración hasta curva siguiente (Rocci, 1993).	85
Figura 3.9 Gráfico de velocidad entre curvas (Rocci, 1993)	86
Figura 3.10 Casuística del modelo de perfil de Ottesen y Krammes (2000)	88
Figura 3.11 Esquema del funcionamiento del modelo de perfil de Fitzpatrick y Collins (2000).....	90
Figura 3.12 Caso A (Fitzpatrick y Collins, 2000)	93
Figura 3.13 Caso B (Fitzpatrick y Collins, 2000)	93
Figura 3.14 Caso C (Fitzpatrick y Collins, 2000)	94
Figura 3.15 Caso D (Fitzpatrick y Collins, 2000)	94
Figura 3.16 Caso E (Fitzpatrick y Collins, 2000)	95
Figura 3.17 Caso F (Fitzpatrick y Collins, 2000)	95
Figura 3.18 Casuística del modelo de perfil de Easa (2003).....	98
Figura 3.19 Geometría de una obstrucción visual en un acuerdo convexo y en una curva	100
Figura 3.20 Esquema de la obstrucción visual en un acuerdo cóncavo con curva en planta	101
Figura 3.21 Modelos de perfil para el modelo revisado considerando la obstrucción visual.....	104
Figura 3.22 Esquema del funcionamiento de las redes neuronales.....	107
Figura 3.23 Diagrama de flujo para la construcción del perfil de velocidad de operación en el IHSDM.....	108
Figura 3.24 Ejemplo de construcción de un perfil estimado de velocidad de operación	111

Figura 6.1 Situación del tramo de la primera prueba inicial	128
Figura 6.2 Ubicación de los controles de la primera prueba inicial	129
Figura 6.3 Intersecciones no significativas.....	130
Figura 6.4 Medición de la sección transversal	130
Figura 6.5 Vehículo empleado en las pruebas iniciales	131
Figura 6.6 Situación del tramo de la segunda prueba inicial.....	132
Figura 6.7 Esquema global de la instalación de los controles para la toma de datos	133
Figura 6.8 Rastreador GPS.....	135
Figura 7.1 Situación del tramo CV-245 [Glorieta Casinos – Alcublas]	151
Figura 7.2 Control 1. CV-245 [Glorieta Casinos – Alcublas]	152
Figura 7.3 Control 2. CV-245 [Glorieta Casinos – Alcublas]	152
Figura 7.4 Marcas en el pavimento para el estudio del carácter naturalístico de la observación.....	153
Figura 7.5 Secuencia captada por el video para el control de la velocidad.....	153
Figura 7.6 Tramos de control de velocidad del tramo Glorieta – Alcublas	154
Figura 7.7 Instalación del control glorieta.....	155
Figura 7.8 Instalación del control Alcublas sur.....	155
Figura 7.9 Entrega del GPS	155
Figura 7.10 Encuestando a los conductores	156
Figura 7.11 Maniobra anómala 1	157
Figura 7.12 Maniobra anómala 2	158
Figura 7.13 Situación del tramo CV-245 [Alcublas – Altura]	158
Figura 7.14 Control 1. CV-245 [Alcublas – Altura].....	159
Figura 7.15 Control 2. CV-245 [Alcublas – Altura].....	160
Figura 7.16 Tramos de control de velocidad del tramo Alcublas – Altura	161
Figura 7.17 Instalación del control Alcublas norte.....	162
Figura 7.18 Instalación del control de Altura	162
Figura 7.19 Localización de los tramos de toma de datos	173
Figura 7.20 Esquema del cambio del sistema de coordenadas al plano local	182
Figura 7.21 Esquema de los vectores inicio y final de un tramo, además de los radios asociados	183

Figura 7.22 Esquema de obtención del punto inicial de cada trayectoria	184
Figura 7.23 Esquema de la situación inicial y final de la obtención de trayectoria media	185
Figura 7.24 Esquema de la obtención del punto medio inicial.	186
Figura 7.25 Esquema de la intersección de las trayectorias con la perpendicular a la trayectoria media.....	187
Figura 7.26 Esquema general del proceso de obtención de la trayectoria media ..	188
Figura 7.27 Trayectoria media del tramo 1: CV-35 [Tuéjar – Titaguas].....	188
Figura 7.28 Ejemplo de trayectoria media calculada con diferentes distancias δ ..	190
Figura 7.29 Detalle de un tramo de curva de la trayectoria media	191
Figura 7.30 Representación de los datos en Google Earth.....	192
Figura 7.31 Representación en Google Earth de la trayectoria media del tramo 1: CV-35 [Tuéjar – Titaguas]	192
Figura 7.32 Esquema del método de obtención del radio a partir de tres puntos ..	193
Figura 7.33 Ejemplo de un detalle del diagrama de curvaturas obtenido a partir de la trayectoria media.....	194
Figura 7.34 Esquema de la variable cadencia (cadencia 1, 2 y 3)	195
Figura 7.35 Ejemplo de depuración de los datos por comparación entre los centros	197
Figura 7.36 Esquema del último proceso de depuración para la obtención del diagrama de curvaturas bruto	198
Figura 7.37 Esquema del funcionamiento del proceso de utilización del método del gradiente	198
Figura 7.38 La solución se traslada por los diferentes puntos en función del ECM199	
Figura 7.39 El proceso del método del gradiente se repite tras la reducción de la distancia.....	199
Figura 7.40 Comparación de diagrama de curvaturas bruto para trayectorias medias calculadas con diferentes valores de δ	201
Figura 7.41 Detalle de diagrama de curvaturas bruto para trayectorias medias calculadas con diferentes valores de δ	201
Figura 7.42 Comparación de diagrama de curvaturas bruto para diferentes cadencias.....	203
Figura 7.43 Detalle de diagrama de curvaturas bruto para diferentes cadencias ..	203
Figura 7.44 Ejemplo de diagrama de azimuth bruto del tramo 1.....	204
Figura 7.45 Ejemplo de diagrama de azimuth bruto del tramo 1. Detalle.....	204

Figura 7.46 Detalle del diagrama de curvaturas neto del tramo 1, con diferentes valores de radio límite	207
Figura 7.47 Detalle de la primera curva del tramo 1 no identificada por el ajuste de curvaturas con $R_{\text{máx}} = 1000 \text{ m}$	207
Figura 7.48 Detalle de la recta situada en el entorno del PK 2+000 del tramo 1 no identificada por el ajuste de curvaturas con $R_{\text{máx}} = 8000 \text{ m}$	208
Figura 7.49 Detalle 1 del diagrama de curvaturas neto del tramo 4, con diferentes valores de porcentaje de variación del radio entre puntos de una curva	208
Figura 7.50 Detalle 2 del diagrama de curvaturas neto del tramo 4, con diferentes valores de porcentaje de variación del radio entre puntos de una curva	209
Figura 7.51 Detalle 3 del diagrama de curvaturas neto del tramo 4, con diferentes valores de porcentaje de variación del radio entre puntos de una curva	209
Figura 7.52 Esquema del ajuste de las curvas de transición	210
Figura 7.53 Diagrama neto de curvaturas del tramo 1	211
Figura 7.54 Representación de curvas circulares en el diagrama de azimuts del tramo 3.....	212
Figura 7.55 Identificación de puntos pertenecientes a una curva circular	213
Figura 7.56 Representación de rectas en el diagrama de azimuts del tramo 3	214
Figura 7.57 Identificación de puntos pertenecientes a una recta	215
Figura 7.58 Identificación de los puntos iniciales del ajuste de dos clotoides consecutivas	216
Figura 7.59 Diagrama neto de azimuts del tramo 1	218
Figura 7.60 Comparación de los diagramas de curvaturas del tramo 3 obtenidos con las dos metodologías	220
Figura 7.61 Radio obtenido a partir del azimut bruto vs radio obtenido a partir de la curvatura bruta	221
Figura 7.62 Longitud de la curva obtenida a partir del azimut bruto vs longitud de la curva obtenida a partir de la curvatura bruta.....	221
Figura 7.63 Diagrama de azimut del tramo de validación de la CV-660	224
Figura 7.64 Diagramas de azimut desplazados del tramo de validación de la CV-660	225
Figura 7.65 Diagrama de curvaturas estimado a partir de datos GPS vs diagrama de curvaturas del proyecto constructivo.....	229
Figura 7.66 Radios obtenidos del proyecto vs radios obtenidos de la restitución ..	229
Figura 7.67 Restitución de las geometrías de validación sobre fotografía aérea [CV-660].....	230

Figura 7.68 Antena del receptor GPS de 10 Hz	231
Figura 7.69 Diagrama de curvaturas GPS 10 Hz vs GPS 1 Hz vs tramo 2	232
Figura 7.70 Diagrama de azimut bruto GPS 10 Hz vs GPS 1 Hz vs tramo 2	232
Figura 7.71 Diagramas de azimut GPS 10 Hz vs GPS 1 Hz vs tramo 2. Detalle 1	233
Figura 7.72 Diagramas de azimut GPS 10 Hz vs GPS 1 Hz vs tramo 2. Detalle 2	233
Figura 7.73 Restitución de las geometrías de validación sobre fotografía aérea [CV-35]	235
Figura 7.74 Perfil longitudinal del tramo 1: CV-35 [Tuéjar – Titaguas]	236
Figura 7.75 Perfil de velocidad – diagrama de curvaturas del tramo 1: CV-35 [Tuéjar – Titaguas]	237
Figura 7.76 Ejemplo de perfil de velocidad de un vehículo condicionado	239
Figura 7.77 Tramificación según el CCR del tramo 1: CV-35 [Tuéjar - Titaguas] ..	245
Figura 7.78 Relación del radio con el parámetro de la clotoide, el CCR_c y el ángulo de deflexión	246
Figura 7.79 Relación del CCR_c y el ángulo de deflexión	247
Figura 7.80 Esquema de la distribución normal	248
Figura 7.81 Distribución de velocidad en la sección central de la curva C01I01	249
Figura 7.82 Parámetro de la clotoide anterior vs velocidad media en curva	252
Figura 7.83 Radio de la curva vs velocidad media en curva	253
Figura 7.84 CCR de la curva vs velocidad media en la curva	253
Figura 7.85 Modelo para la estimación de la velocidad media en una curva con el parámetro de la clotoide anterior como variable explicativa	254
Figura 7.86 Modelo para la estimación de la velocidad media en una curva con el radio como variable explicativa	255
Figura 7.87 Modelo para la estimación de la velocidad media en una curva con la tasa de cambio de curvatura de la curva como variable explicativa	255
Figura 7.88 Radio de la curva vs desviación típica de la velocidad en curva	257
Figura 7.89 Parámetro de la clotoide anterior vs desviación típica de la velocidad en curva	257
Figura 7.90 Modelo para la estimación de la desviación típica de la velocidad en una curva con el radio de la curva como variable explicativa	258
Figura 7.91 Modelo para la estimación de la desviación típica de la velocidad en una curva con el parámetro de la clotoide anterior como variable explicativa	259

Figura 7.92 Diagrama Box-and-Whisher para la comparación V_{85MIN} vs V_{MIN85} vs V_{85CTRO}	263
Figura 7.93 Obtención de la velocidad mínima en curvas a partir del perfil de velocidad de operación	264
Figura 7.94 Inversa del radio de la curva vs V_{85} en curva.....	266
Figura 7.95 CCR de la curva vs V_{85} en curva	266
Figura 7.96 Parámetro de la clotoide anterior vs V_{85} en curva.....	267
Figura 7.97 Radio de la curva vs V_{85} en curva.....	267
Figura 7.98 Longitud de la clotoide anterior vs V_{85} en curva.....	268
Figura 7.99 Situación de las curvas C06V01 y C06V02.....	268
Figura 7.100 Situación de la curva C08V01	269
Figura 7.101 Modelos de regresión lineal para la estimación de la V_{85} en curvas: C1, C4 y C7	270
Figura 7.102 Modelos de regresión lineal para la estimación de la V_{85} en curvas: C2, C5 y C8	271
Figura 7.103 Modelos de regresión lineal para la estimación de la V_{85} en curvas: C3, C6 y C9	271
Figura 7.104 Modelo C10 de regresión lineal múltiple para la estimación de la V_{85} en curvas	272
Figura 7.105 Modelo de regresión no lineal para la estimación de la V_{85} en curvas	273
Figura 7.106 Distribución de velocidad de la sección central de la recta R0111	291
Figura 7.107 Longitud de la recta vs velocidad media en recta	294
Figura 7.108 $L+LCL1_2+LCL2_1$ vs velocidad media en recta	295
Figura 7.109 $CCR_{C_R_C}$ vs velocidad media en recta	295
Figura 7.110 $CCR_{100inicio}$ vs velocidad media en recta.....	296
Figura 7.111 Modelo para la estimación de la velocidad media en una recta con la suma de la longitud de la recta y las clotoides adyacentes como variable explicativa	297
Figura 7.112 $L+LCL1_2+LCL2_1$ vs desviación típica en recta.....	298
Figura 7.113 Longitud de la recta vs desviación típica de la velocidad en recta	299
Figura 7.114 Modelo para la estimación de la desviación típica de la velocidad en una recta con su longitud como variable explicativa	300
Figura 7.115 Obtención de la velocidad de operación en rectas a partir del perfil de velocidad de operación	301

Figura 7.116 Longitud de la recta vs V_{85} en recta	302
Figura 7.117 Índice $GI1$ vs V_{85} en recta	303
Figura 7.118 Índice GM vs V_{85} en recta	303
Figura 7.119 $CCR_{100inicio}$ vs V_{85} en recta	304
Figura 7.120 $CCR_{C_R_C}$ vs V_{85} en recta	304
Figura 7.121 Modelos de regresión lineal para la estimación de la V_{85} en rectas: R1 y R2.....	306
Figura 7.122 Modelos de regresión lineal para la estimación de la V_{85} en rectas: R3 y R4.....	306
Figura 7.123 Modelos de regresión para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud mayor o igual a 700 m: R5 y R6	308
Figura 7.124 Ángulo de deflexión de la curva anterior vs V_{85} en rectas de longitud menor a 700 m y radio de la curva anterior superior a 600 m.....	309
Figura 7.125 Radio de la curva anterior vs V_{85} en rectas de longitud menor a 700 m y radio de la curva anterior superior a 600 m.....	309
Figura 7.126 Modelo de regresión múltiple para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud inferior a 700 m y radio de la curva anterior inferior o igual a 600 m: R7 .	310
Figura 7.127 Modelo de regresión no lineal para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud inferior a 700 m y radio de la curva anterior inferior o igual a 600 m: R8 .	311
Figura 7.128 Longitud de la recta vs V_{85} en rectas de longitud menor a 700 m y radio de la curva anterior superior a 600 m.....	312
Figura 7.129 ΔV_{85} vs $\Delta_{85}V$	326
Figura 7.130 Modelo ΔV_{85} vs $\Delta_{85}V$	327
Figura 7.131 Modelos de regresión lineal para la estimación de la $\Delta_{85}V$	328
Figura 7.132 CCR_C vs d_{85}	331
Figura 7.133 Parámetro A vs d_{85}	332
Figura 7.134 Radio vs d_{85}	332
Figura 7.135 Modelos de regresión lineal para la estimación de la d_{85} : DEC1, DEC2 y DEC3.....	333
Figura 7.136 Modelos de regresión lineal para la estimación de la d_{85} : DEC4, DEC5 y DEC6.....	334
Figura 7.137 Perfiles de velocidad de los conductores correspondientes al percentil 85 de la tasa de deceleración, para curvas con radio inferior a 200 metros	336
Figura 7.138 Perfiles de velocidad de los conductores correspondientes al percentil 85 de la tasa de deceleración, para curvas con radio superior a 200 metros	336

Figura 7.139 CCR_C vs a_{85}	349
Figura 7.140 Parámetro y longitud de la clotoide posterior a la curva vs a_{85}	350
Figura 7.141 Radio vs a_{85}	350
Figura 7.142 Modelos de regresión lineal para la estimación de la a_{85} : ACC1, ACC2 y ACC3.....	351
Figura 7.143 Modelos de regresión lineal para la estimación de la a_{85} : ACC4, ACC5 y ACC6.....	352
Figura 7.144 Modelo para la estimación de la V_{85} en curvas.....	361
Figura 7.145 Modelo para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud mayor o igual a 700 metros.....	361
Figura 7.146 Modelo de regresión para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud inferior a 700 m y radio de la curva anterior inferior o igual a 600 m.....	362
Figura 7.147 Modelo de regresión para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud inferior a 700 m y radio de la curva anterior superior a 600 m.....	363
Figura 7.148 Modelo para la estimación de la d_{85}	364
Figura 7.149 Modelo para la estimación de la a_{85}	365
Figura 7.150 Regla de construcción 1 del perfil continuo de velocidad de operación.....	366
Figura 7.151 Regla de construcción 2a del perfil continuo de velocidad de operación.....	367
Figura 7.152 Regla de construcción 2b del perfil continuo de velocidad de operación.....	367
Figura 7.153 Regla de construcción 3a del perfil continuo de velocidad de operación.....	368
Figura 7.154 Regla de construcción 3b del perfil continuo de velocidad de operación.....	368
Figura 7.155 Regla de construcción 3c del perfil continuo de velocidad de operación.....	369
Figura 7.156 Regla de construcción 4a del perfil continuo de velocidad de operación.....	370
Figura 7.157 Regla de construcción 4b del perfil continuo de velocidad de operación.....	370
Figura 7.158 Regla de construcción 4c del perfil continuo de velocidad de operación.....	371
Figura 7.159 Comparación entre el perfil de velocidad empírico y los estimados..	372

Figura 7.160 RCM de los perfiles estimados de velocidad de operación en curvas	376
Figura 7.161 Media y desviación típica de la RCM por rangos de radio de la curva circular	377
Figura 7.162 RCM de los perfiles estimados de velocidad de operación en clotoides	378
Figura 7.163 Media y desviación típica de la RCM en la clotoide por rangos de radio	378
Figura 7.164 RCM de los perfiles estimados de velocidad de operación en rectas	379
Figura 7.165 Media y desviación típica de la RCM en la recta por rangos de longitud de la misma.....	380
Figura 8.1 Distribución de velocidad en curvas vs distribución de velocidad en rectas	383
Figura 8.2 Ejemplo de clotoides	385
Figura 8.3 Parámetro de la clotoide vs velocidad de operación en curvas	386
Figura 8.4 Parámetro de la clotoide vs tasa de deceleración.....	386
Figura 8.5 Parámetro de la clotoide vs tasa de aceleración.....	387
Figura 8.6 V_{85} en la curva vs pendiente	390
Figura 8.7 V_{85} en la recta vs pendiente	392
Figura 8.8 $\Delta_{85}V$ vs pendiente curva	393
Figura 8.9 $\Delta_{85}V$ vs pendiente recta	393
Figura 8.10 d_{85} vs pendiente curva	394
Figura 8.11 d_{85} vs pendiente recta	394
Figura 8.12 a_{85} vs pendiente curva	395
Figura 8.13 a_{85} vs pendiente recta	395

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Recomendaciones de la AASHTO para la elección de velocidad de diseño	20
Tabla 3.2 Modelos de Ye et al. (2001)	29
Tabla 3.3 Relaciones calibradas por el estudio de Crisman et al. (2005)	32
Tabla 3.4 Resultados de los modelos de Jorgensen y Polak (1993).....	44
Tabla 3.5 Modelos para estimación de velocidad de operación en curvas con el radio o el grado de curvatura como variables independientes	53
Tabla 3.6 Modelos para estimación de velocidad de operación en curvas con el radio o el grado de curvatura como variables independientes, considerando otras variables.....	54
Tabla 3.7 Modelos para la estimación de la velocidad de operación en curvas dependientes de varias variables.....	56
Tabla 3.8 Modelos para la estimación de la velocidad de operación en curvas dependientes de varias variables por condicionantes.....	56
Tabla 3.9 Ecuaciones obtenidas por Nie y Hassan (2007)	59
Tabla 3.10 Relación entre parámetros referentes a diferenciales de velocidad.....	69
Tabla 3.11 Modelos para la estimación de parámetros referentes a diferenciales de velocidad.....	70
Tabla 3.12 Modelos de estimación de la velocidad de operación de Fitzpatrick et al. (2000).....	73
Tabla 3.13 Tasas de deceleración/aceleración obtenidas por Crisman et al. (2005)	74
Tabla 3.14 Resistencia al rozamiento longitudinal	80
Tabla 3.15 Resistencia al rozamiento transversal.....	80
Tabla 3.16 Obtención de los coeficientes de rozamiento transversal	81
Tabla 3.17 Ecuaciones para construir el perfil de velocidad correspondiente al percentil 85	89
Tabla 3.18 Casuística del modelo en función de las longitudes crítica y requerida .	89
Tabla 3.19 Cálculo de las variaciones necesarias para el desarrollo del modelo	96
Tabla 3.20 Variables para el cálculo del modelo de Easa (2003)	99
Tabla 3.21 Ecuaciones para la estimación de la velocidad de operación en carreteras de alta velocidad utilizadas en el IHSDM.....	109
Tabla 3.22 Ecuaciones para la estimación de la velocidad de operación en carreteras de baja velocidad utilizadas en el IHSDM	110

Tabla 3.23 Ecuaciones para la estimación de las tasas de deceleración y aceleración utilizadas en el IHSDM.....	111
Tabla 7.1 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la curva del tramo Glorieta Casinos – Alcublas.....	163
Tabla 7.2 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la recta del tramo Glorieta Casinos – Alcublas.....	164
Tabla 7.3 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la curva del tramo Alcublas – Glorieta Casinos.....	165
Tabla 7.4 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la recta del tramo Alcublas – Glorieta Casinos.....	166
Tabla 7.5 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la curva del tramo Alcublas – Altura.....	167
Tabla 7.6 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la recta del tramo Alcublas – Altura.....	168
Tabla 7.7 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la curva del tramo Altura – Alcublas.....	169
Tabla 7.8 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la recta del tramo Altura – Alcublas.....	170
Tabla 7.9 Características básicas de los tramos de toma de datos.....	174
Tabla 7.10 Resumen de las jornadas de toma de datos.....	174
Tabla 7.11 Porcentaje de conductores participantes en las encuestas.....	176
Tabla 7.12 Caracterización de los elementos geométrico mediante el azimut.....	212
Tabla 7.13 Estado de alineaciones presentado en el proyecto constructivo.....	223
Tabla 7.14 Estado de alineaciones estimado del tramo de la CV-660 mediante el diagrama de curvaturas.....	226
Tabla 7.15 Estado de alineaciones estimado del tramo de la CV-660 mediante el diagrama de azimuts.....	228
Tabla 7.16 Características geométricas de las curvas utilizadas en el estudio.....	242
Tabla 7.17 Rangos de las principales características geométricas de las curvas..	243
Tabla 7.18 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en curva.....	244
Tabla 7.19 Muestra necesaria vs muestra real en secciones curva.....	251
Tabla 7.20 Resultados del análisis de correlación de la velocidad media en curvas.....	252
Tabla 7.21 Resultados del análisis de correlación de la desviación típica de la velocidad en curvas.....	256

Tabla 7.22 Resultados obtenidos tras la comparación de medias entre V85MIN y VMIN85	261
Tabla 7.23 Resultados obtenidos tras la comparación de medias entre V85MIN y V85CTRO	262
Tabla 7.24 Resultados obtenidos tras la comparación de medias entre VMIN85 y V85CTRO	262
Tabla 7.25 Resultados del análisis de correlación de la V_{85} en curvas.....	265
Tabla 7.26 Modelos de regresión lineal simple para la estimación de la V_{85} en curvas	270
Tabla 7.27 Modelos de regresión lineal múltiple para la estimación de la V_{85} en curvas	272
Tabla 7.28 Modelos de regresión no lineal para la estimación de la V_{85} en curvas.....	273
Tabla 7.29 Muestra conductor-curva de la variable CONDUCTOR	274
Tabla 7.30 Muestra conductor-curva de las variables relacionadas con la edad del conductor	275
Tabla 7.31 Muestra conductor-curva de las variables relacionadas con la experiencia del conductor	275
Tabla 7.32 Muestra conductor-curva de las variables relacionadas con la longitud del viaje.....	276
Tabla 7.33 Muestra conductor-curva de la variable HABITUAL	276
Tabla 7.34 Muestra conductor-curva de la variable LABORAL	276
Tabla 7.35 Muestra conductor-curva de las variables relacionadas con los ocupantes	276
Tabla 7.36 Muestra conductor-curva de las variables relacionadas con la longitud del viaje.....	277
Tabla 7.37 Resultados del análisis del estudio de la velocidad elegida en curvas.....	277
Tabla 7.38 Resultados del análisis inicial del estudio de la velocidad desarrollada en curvas	280
Tabla 7.39 Resultados del análisis del estudio de la velocidad desarrollada en curvas	281
Tabla 7.40 Características geométricas de las rectas utilizadas en el estudio	286
Tabla 7.41 Rangos de las principales características geométricas de las rectas ..	286
Tabla 7.42 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en recta	287
Tabla 7.43 Muestra necesaria vs muestra real en secciones recta.....	293

Tabla 7.44 Resultados del análisis de correlación de la velocidad media en rectas	294
Tabla 7.45 Resultados del análisis de correlación de la desviación típica de la velocidad en rectas	298
Tabla 7.46 Resultados del análisis de correlación de la V_{85} en rectas.....	302
Tabla 7.47 Modelos de regresión lineal simple para la estimación de la V_{85} en rectas	305
Tabla 7.48 Modelos para la estimación de la V_{85} en rectas con longitud igual o mayor a 700 metros: R5 y R6	307
Tabla 7.49 Modelos para la estimación de la V_{85} en rectas con longitud inferior a 700 metros y radio de la curva anterior inferior a 600 metros: R7 y R8	310
Tabla 7.50 Muestra conductor-recta de la variable CONDUCTOR	313
Tabla 7.51 Muestra conductor-recta de las variables relacionadas con la edad del conductor	313
Tabla 7.52 Muestra conductor-recta de las variables relacionadas con la experiencia del conductor.....	313
Tabla 7.53 Muestra conductor-recta de las variables relacionadas con la longitud del viaje.....	313
Tabla 7.54 Muestra conductor-recta de la variable HABITUAL.....	313
Tabla 7.55 Muestra conductor-recta de la variable LABORAL.....	314
Tabla 7.56 Muestra conductor-recta de las variables relacionadas con los ocupantes	314
Tabla 7.57 Muestra conductor-recta de las variables relacionadas con la longitud del viaje.....	314
Tabla 7.58 Resultados del análisis del estudio de la velocidad elegida en rectas .	315
Tabla 7.59 Resultados del análisis inicial del estudio de la velocidad desarrollada en rectas	317
Tabla 7.60 Resultados del análisis del estudio de la velocidad desarrollada en rectas	318
Tabla 7.61 Transiciones recta-curva utilizadas en el estudio.....	321
Tabla 7.62 Rangos de las principales características geométricas de las transiciones recta-curva	322
Tabla 7.63 Tamaños de muestra utilizados para el estudio de las variaciones de velocidad en las transiciones recta-curva	322
Tabla 7.64 Resultado del análisis de la comparación de ΔV_{85} y $\Delta_{85}V$	325
Tabla 7.65 Resultados del análisis de correlación de la tasa de deceleración	330

Tabla 7.66 Modelos de regresión lineal simple para la estimación de la d_{85}	333
Tabla 7.67 Tipos de deceleración y porcentaje de aparición en la muestra considerada	334
Tabla 7.68 Muestra conductor-transición recta-curva de la variable CONDUCTOR	337
Tabla 7.69 Muestra conductor- transición recta-curva de las variables relacionadas con la edad del conductor	338
Tabla 7.70 Muestra conductor- transición recta-curva de las variables relacionadas con la experiencia del conductor.....	338
Tabla 7.71 Muestra conductor- transición recta-curva de las variables relacionadas con la longitud del viaje.....	338
Tabla 7.72 Muestra conductor- transición recta-curva de la variable HABITUAL... 338	
Tabla 7.73 Muestra conductor- transición recta-curva de la variable LABORAL.... 338	
Tabla 7.74 Muestra conductor- transición recta-curva de las variables relacionadas con los ocupantes	339
Tabla 7.75 Muestra conductor- transición recta-curva de las variables relacionadas con la longitud del viaje.....	339
Tabla 7.76 Resultados del análisis del estudio de la tasa de deceleración elegida340	
Tabla 7.77 Resultados del análisis inicial del estudio de la tasa de deceleración desarrollada	341
Tabla 7.78 Resultados del análisis del estudio de la tasa de deceleración desarrollada	342
Tabla 7.79 Transiciones curva-recta utilizadas en el estudio	345
Tabla 7.80 Rangos de las principales características geométricas de las transiciones curva-recta	345
Tabla 7.81 Tamaños de muestra utilizados para el estudio de la aceleración	346
Tabla 7.82 Resultados del análisis de correlación de la tasa de aceleración	349
Tabla 7.83 Modelos de regresión lineal simple para la estimación de la a_{85}	351
Tabla 7.84 Tipos de aceleración y porcentaje de aparición en la muestra considerada	353
Tabla 7.85 Muestra conductor-transición curva-recta de la variable CONDUCTOR	354
Tabla 7.86 Muestra conductor- transición curva-recta de las variables relacionadas con la edad del conductor	354
Tabla 7.87 Muestra conductor- transición curva-recta de las variables relacionadas con la experiencia del conductor.....	355

Tabla 7.88 Muestra conductor- transición curva-recta de las variables relacionadas con la longitud del viaje.....	355
Tabla 7.89 Muestra conductor- transición curva-recta de la variable HABITUAL...	355
Tabla 7.90 Muestra conductor- transición curva-recta de la variable LABORAL....	355
Tabla 7.91 Muestra conductor- transición curva-recta de las variables relacionadas con los ocupantes	355
Tabla 7.92 Muestra conductor- transición curva-recta de las variables relacionadas con la longitud del viaje.....	355
Tabla 7.93 Resultados del análisis del estudio de la tasa de aceleración elegida .	356
Tabla 7.94 Resultados del análisis inicial del estudio de la tasa de aceleración desarrollada	357
Tabla 7.95 Resultados del análisis del estudio de la tasa de aceleración desarrollada	359
Tabla 8.1 Resultados del estudio de correlación V_{85} en curva vs pendiente.....	390
Tabla 8.2 Resultados del estudio de correlación V_{85} en recta vs pendiente	391
Tabla 8.3 Resultados del estudio de correlación ΔV_{85} vs pendiente y $\Delta_{85}V$ vs pendiente	392
Tabla 8.4 Resultados del estudio de correlación d_{85} vs pendiente.....	393
Tabla 8.5 Resultados del estudio de correlación a_{85} vs pendiente.....	395
Tabla 8.2 Comparación de variables para la definición de los estilos de conducción	399

1. INTRODUCCIÓN

Los accidentes de tráfico constituyen uno de los principales problemas de nuestra sociedad. Cada año, 1.2 millones de personas fallecen y entre 20 y 50 millones resultan heridas por esta causa. Si la tendencia continúa, los accidentes pueden llegar a convertirse en 2020 en la tercera causa global de lesiones y de muerte en el mundo.

Con el fin de minimizar al máximo esta cantidad es imprescindible considerar los tres factores concurrentes de la siniestralidad: el conductor, el vehículo y la infraestructura. Este último es considerado por algunos estudios como el causante, en mayor o menor medida, del 34 % de los accidentes en carretera (Treat et al., 1979 y Highway Safety Manual, 2010). De hecho, investigaciones previas han mostrado cómo las colisiones tienden a concentrarse desproporcionadamente en ciertos tramos de la carretera, indicando que además de los errores de los conductores, las características de la carretera juegan un papel primordial cuando se produce un accidente. Una de las principales razones relacionadas con la infraestructura puede ser la baja consistencia del diseño geométrico. Esta situación 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, produciendo además una alta variabilidad en la velocidad entre elementos de la carretera y entre diferentes conductores que puede conllevar una mayor frecuencia de accidentes.

Los criterios más comúnmente utilizados para la evaluación de la consistencia están basados en el análisis de las variaciones de la velocidad de operación (Gibreel et al., 1999), que generalmente se identifica con el percentil 85 de la distribución de velocidades obtenida de vehículos ligeros circulando en condiciones de flujo libre en un tramo de carretera. Este parámetro puede obtenerse a partir de mediciones durante la fase de explotación de una carretera. Sin embargo, tanto en la fase de planeamiento como en la de proyecto únicamente puede estimarse. Para ello, se utilizan los modelos de estimación de la velocidad de operación que relacionan este parámetro con las características geométricas de los elementos de la carretera.

Como se verá en el apartado referente al estado del arte, existe una gran diversidad de modelos de velocidad de operación según la zona en las que se ha llevado a cabo la toma de datos para su calibración. En general, se distingue entre modelos de estimación de velocidad de operación en curvas, en rectas, modelos de estimación de diferenciales de velocidad y de tasas de deceleración/aceleración. Estos modelos pueden unirse, mediante diferentes reglas constructivas, para formar un perfil de velocidad de operación estimado con el que evaluar la consistencia del diseño geométrico de un tramo de carretera y, como consecuencia, la seguridad vial de la misma, especialmente en aquellos casos en los que se utilizan modelos globales de consistencia que permiten estimar el número de accidentes en un periodo determinado. De esta forma, se utiliza la evaluación de la consistencia como una medida sustitutiva de la seguridad vial.

Sin embargo, la mayor parte de las investigaciones se han basado en datos puntuales de velocidad medidos mediante pistolas radar manuales o detectores

ubicados en la recta anterior y en los puntos inicial y medio de la curva, asumiendo en muchos casos que la deceleración se produce únicamente en el tramo recto y que la velocidad en la curva se mantiene constante.

Esta hipótesis era necesaria debido a que para la calibración de los modelos se partía de datos discretos y aislados de la velocidad. En el caso de que se pudieran obtener fácilmente datos continuos de la evolución de los vehículos en un tramo de vía, esta hipótesis podría ser comprobada y los modelos citados anteriormente calibrados adecuadamente, ajustándose mejor al fenómeno real.

No obstante, aunque en el estudio del comportamiento de los conductores una de las variables más importantes es la velocidad a la que circulan y su variación, no es suficiente disponer de datos continuos de velocidad sino que también es necesario conocer la geometría de las alineaciones en las que se desarrolla esta velocidad con el fin de poder relacionarlas, como se ha citado anteriormente.

Los datos sobre las características geométricas de la mayor parte de las carreteras existentes no están disponibles, no tienen el formato adecuado, no están actualizados o no tienen la precisión necesaria. Por ello, es necesario desarrollar un método que permita tanto obtener perfiles continuos de velocidad como la restitución geométrica de la carretera en la que se desarrollan.

Estos datos pueden facilitarse con la utilización de equipos GPS, cuyo coste es cada vez más reducido, que permiten el seguimiento de vehículos, tanto en tiempo real como de manera pasiva.

En el presente trabajo de investigación se presenta una nueva metodología para la restitución de la geometría de la vía y la obtención de perfiles de velocidad de operación mediante la utilización de rastreadores GPS.

Utilizando equipos GPS de seguimiento pasivo con cadencia de toma de datos de 1 segundo y seleccionando una muestra suficiente de vehículos realizando el mismo recorrido en ambos sentidos de un tramo de vía, ha sido posible calcular la trayectoria media desarrollada por ellos para, a partir de ella, obtener una estimación de la geometría del trazado de la vía. Del mismo modo, se han obtenido los perfiles individuales de velocidad de cada uno de los vehículos con los que estudiar la velocidad de operación en cada punto y su dispersión.

A partir de estos datos, incluyendo los relacionados con la geometría y la velocidad, se ha estudiado la distribución de la velocidad y se han desarrollado modelos de perfiles de velocidad de operación para secciones rectas, curvas y para la estimación del diferencial de velocidad en las transiciones recta-curva-recta, correlacionando la velocidad desarrollada con las características geométricas de la vía.

Estos modelos son aplicables al estudio de la seguridad vial, tanto en nuevos trazados, antes de adoptar las soluciones definitivas, evaluando de esta forma la consistencia del trazado, como en carreteras en servicio. Así, se consigue una herramienta para la evaluación de uno de los factores concurrentes como es la infraestructura. Sin embargo, también es importante considerar en el estudio los otros dos factores, es decir, el factor humano y el vehículo.

Considerando la dificultad del estudio de la influencia de estos factores en la seguridad vial, en la presente investigación, se ha abordado este estudio relacionando las características de los conductores, el tipo de vehículo y las características del viaje con las velocidades en rectas y curvas y las tasas de deceleración y aceleración desarrolladas.

Todo ello se ha realizado únicamente para carreteras de calzada única de dos carriles con doble sentido de circulación ya que en ellas se producen el 80 % de los muertos por accidente de tráfico en las carreteras interurbanas de España.

2. ANTECEDENTES

En la convocatoria para el año 2006 de la concesión de ayudas para la realización de proyectos de investigación científica, desarrollo e innovación, ligadas al Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte, en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007 (BOE de 24 de julio de 2006), se presentó la solicitud de ayuda para el proyecto de investigación de referencia "PT-2006-031-25IAPP" con título "**REVEL-Una metodología para la REvisión de los límites de VELOCidad**", siendo el Investigador Principal el Prof. Alessandro Rocci Boccaleri, adscrito en ese momento a la Universidad Politécnica de Madrid. Dicha solicitud fue informada favorablemente por la Comisión de Selección el 21 de noviembre de 2006.

En dicho proyecto, el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras de la Universidad Politécnica de Valencia, liderado por el Prof. Alfredo García García, era el encargado de llevar a cabo una campaña de medición de velocidades con la utilización de dispositivos GPS con el fin de establecer un modelo de perfil de velocidades de operación, siendo este uno de los objetivos específicos del proyecto de investigación.

A pesar de que en julio de 2008 el proyecto fue resuelto unilateralmente por el CEDEX, el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras decidió continuar con su parte de la investigación basándose en los datos obtenidos durante la campaña de toma de datos realizada en el periodo en el que proyecto REVEL se encontraba vigente.

Para la ejecución experimental se contó con la colaboración de la Dirección General de Tráfico a través del Centro de Gestión de Tráfico de Valencia, la Conselleria de Infraestructuras y Transporte de la Generalitat Valenciana, el Área de Carreteras de la Diputación de Valencia y el INTRAS.

3. ESTADO DEL ARTE

Con el fin de conocer el comportamiento de los conductores, la variable que se pretende caracterizar es la velocidad a la que circulan y sus variaciones. Este concepto de velocidad a la que operan los conductores es conocido como velocidad de operación.

Para ello, es necesario relacionar la velocidad desarrollada en un tramo de carretera con las características geométricas del mismo, pero también con las características de los vehículos y, sobre todo, de los conductores.

En este estado del arte se resume cómo investigaciones anteriores han dado solución a la toma de datos de la velocidad y de los tres factores concurrentes, como son la infraestructura, el factor humano y el vehículo; así como también cómo han estudiado la influencia de estos factores en la velocidad de operación.

El desarrollo de este estado del arte comienza con una visión general de los distintos métodos utilizados anteriormente para la toma de datos de las variables citadas. En ella, se aborda en profundidad las distintas metodologías utilizadas para la restitución de la geometría de la vía. Estos métodos permiten obtener los valores de los distintos parámetros geométricos que constituyen las variables independientes en los modelos de estimación de velocidades que después se relacionan.

Sin embargo, antes de proceder a la revisión de los distintos modelos existentes, se presenta un apartado referente únicamente a la velocidad, definiendo los distintos conceptos de velocidades, además de su evolución en el tiempo y las relaciones entre los distintos tipos.

Una vez presentada una visión general de la velocidad, el estado del arte se centra en la velocidad de operación que es considerada el componente más evidente sobre el que se refleja el comportamiento de los conductores. Se exponen en distintos subapartados cómo se ha abordado la distribución de la velocidad de operación según distintos percentiles; cuáles son las distintas variables que tienen una influencia comprobada tras diferentes estudios en la velocidad de operación, diferenciando entre variables genéricas y variables que influyen específicamente en la velocidad en rectas, curvas horizontales y acuerdos verticales; y cómo influyen las curvas de transición en la velocidad de operación.

Algunos de los modelos más representativos presentes en la literatura se presentan en el siguiente apartado. En primer lugar, se realiza una visión general de las distintas tipologías de modelos de velocidad de operación y, a continuación, se distinguen entre modelos para la estimación de velocidades en curvas, en rectas y en curvas de transición, modelos para la estimación de la deceleración y aceleración, modelos para la estimación de la variación de la velocidad, modelos de perfil de velocidad de operación y modelos avanzados.

Asimismo, se lleva a cabo una descripción de los principales estudios presentes en la literatura en los que se relaciona la velocidad desarrollada con las características del conductor, del vehículo y del viaje.

El apartado correspondiente al estado del arte concluye con una revisión de las deficiencias que se han encontrado en los diferentes modelos y estudios analizados que pretenden caracterizar la velocidad. Estas deficiencias abarcan desde las relacionadas con la toma de datos y, por tanto, con los datos iniciales en los que se basan los estudios, hasta la aplicabilidad de los mismos.

3.1. METODOLOGÍAS DE TOMA DE DATOS

Para la caracterización y modelización de la velocidad, uno de los desafíos más importantes es la disponibilidad de datos de calidad de las variables implicadas. Por ello, en este estado del arte se dedica un apartado para la descripción de los distintos métodos de toma de datos, tanto datos de velocidad como los relacionados con la geometría de la vía, el conductor y el tipo de vehículo.

3.1.1. Toma de datos para restitución de la geometría de la vía

Para el estudio del comportamiento de los conductores no es suficiente con obtener datos de la velocidad desarrollada por los mismos sino que es necesario relacionarla con el trazado de la vía por la que estos circulan. De esta forma, trabajando en la correlación de la velocidad desarrollada con las características geométricas es posible estudiar la influencia del trazado de la vía en el comportamiento de los usuarios. Para ello, se preciso disponer de la geometría de la vía que, en la mayoría de los casos no se encuentra disponible, por lo que se ha de desarrollar una metodología para su obtención.

Hasta el momento se han llevado a cabo distintas investigaciones cuyo fin ha sido la restitución de la geometría de la vía. En ellas se han utilizado principalmente dos metodologías: imágenes de satélite de alta resolución o GPSs de alta precisión.

3.1.1.1. Imágenes de satélite de alta resolución

Entre las investigaciones realizadas con el objetivo de obtener la geometría de la vía destacan las llevadas a cabo por Easa et al. (2007) y Dong et al. (2007).

En ellas, buscaron generar mapas de carreteras digitales de forma rápida y barata a partir de las imágenes de satélite de alta resolución. Easa et al. (2007) presentaron una metodología para obtener la alineación horizontal de una carretera utilizando imágenes IKONOS. A partir de estas imágenes se obtiene la restitución de las curvas horizontales simples y curvas en S sin recta intermedia y mediante la unión de estas con líneas rectas se obtiene la geometría de la vía. Los resultados mostraron que el método propuesto convergía en todos los casos y podía ser utilizado para la restitución de curvas horizontales. Sin embargo, en su estudio no tuvieron en cuenta las curvas de transición.

Dentro del proceso se distinguen distintas fases:

- Preprocesamiento de la imagen para convertir la imagen en color en una imagen binaria con únicamente los ejes.

- Restitución de la carretera: para la restitución de las curvas horizontales de la carretera y las rectas asociadas, mediante el método propuesto, a partir de la imagen de ejes se precisa el uso de la transformación Hough. Esta transformación es un conocido algoritmo para la detección de características de imágenes raster. Con ella, se identifican los píxeles de cada uno de los elementos y se detectan las rectas y las curvas simples y en S existentes, obteniendo los parámetros que las caracterizan.

Tomando como base el estudio anterior, la detección y restitución de las curvas de transición simétricas ha sido abordado en el estudio desarrollado por Dong et al. (2007). El proceso es similar al necesario para la restitución de las curvas horizontales, identificando las curvas de transición como espirales cúbicas.

En ambos estudios se han aproximado de forma semiautomática las características de cada uno de los elementos a partir de imágenes de satélite de alta definición, aproximando la nube de puntos filtrada de la imagen a curvas minimizando el error cuadrático medio (ECM). Para llevar a cabo este proceso es el usuario el que debe intuir la posición de los distintos elementos del trazado de las imágenes para finalmente restituir el eje exterior y el interior de la carretera pero no el eje propiamente dicho de la misma.

3.1.1.2. Utilización de datos procedentes de GPS

El aumento de la variedad, de la disponibilidad y de la precisión de los dispositivos basados en los sistemas de posicionamiento global (GPS) permite que su tecnología sea utilizada en nuevas e innovadoras aplicaciones.

Utilizando esta tecnología, el Departamento de Transportes de Kansas ha tomado datos espaciales de su red de carreteras a partir de campañas de datos anuales desde 1977 con el consiguiente problema en el manejo de la gran cantidad de datos geográficos obtenidos. Estos datos fueron tomados cada año por un vehículo circulando en ambos sentidos de circulación de la carretera a 100 km/h equipado con un GPS que registraba datos con una cadencia de 1 segundo. Por ello, Ben-Arieh et al. (2004) propusieron una metodología para la organización y depuración de esta gran cantidad de datos, su condensación y la generación de curvas B-spline como aproximación a la geometría de la carretera. Notaron que los datos presentan cierta inconsistencia debido a que para cada carretera, el vehículo circulaba por los dos sentidos de circulación y la distancia entre los carriles podía llegar a ser de 60 m, debido también a las diferencias en las estaciones en las que los datos fueron tomados (para una carretera hay datos de varios años), a los errores inherentes al sistema y a los satélites y a los comportamientos arbitrarios del vehículo como pueden ser adelantamientos, cambios de carril, salida de la vía para parar en una estación de servicio, etc. Por todo ello, establecieron el siguiente procedimiento para la aproximación de la geometría de la carretera:

- Convertir los datos proporcionados por el GPS en latitud y longitud a un sistema de coordenadas cartesianas.
- Clasificar los datos obtenidos basados en la dirección principal de la carretera.

- Depurar los datos eliminando repeticiones.
- Generar una representación geométrica de la carretera mediante aproximación mediante B-splines.

La metodología para la aproximación a la geometría de la carretera se validó a partir de la comparación de la aproximación B-spline con los datos de diseño real de la carretera.

En el trabajo presentado únicamente se basaron en la dimensión de la planta de carretera. Sin embargo, subrayaron el hecho de que la misma metodología puede ser utilizada para la restitución de la dimensión vertical de la misma.

De hecho, los mismos datos, esta vez incluyendo la componente vertical, han sido utilizados por Nehate et al. (2006) para presentar una metodología para el cálculo de la distancia de visibilidad disponible teniendo en cuenta tanto la alineación horizontal y el perfil longitudinal de la carretera como la combinación de ambos a partir de datos capturados por un GPS.

Con los datos almacenados en este dispositivo han parametrizado la geometría de la carretera utilizando esplines que modelizan la trayectoria pero sin pretender restituir la geometría de la vía.

Los datos son obtenidos por los GPS cada segundo y registrados en forma de latitud, longitud y altitud. Posteriormente, transformaron las coordenadas terrestres en coordenadas cartesianas utilizando la transformación de coordenadas basada en la proyección conforme de Lambert. Después hicieron un análisis de valores atípicos y estos fueron eliminados.

La carretera obtenida a partir de datos de GPS se ha representado como una curva paramétrica a trozos en forma de B-splines cúbicos, incluyendo rectas, curvas horizontales y curvas verticales. De esta forma, la curva que representa la carretera está dividida en diferentes tramos y en las fronteras se satisfacen la condición de continuidad de segundo orden, es decir, la segunda derivada en el punto de intersección es la misma para ambas secciones de la curva.

El modelo presentado es adecuado para niveles de precisión moderados ya que a pesar de que las curvas B-splines tienen una continuidad de segundo orden, se pueden presentar formas de cimas y valles (dentro de los cuatro puntos consecutivos que representa la spline) en el perfil de la carretera representando una superficie bacheada.

Por otra parte, Imran et al. (2006) han propuesto una metodología para la restitución de la alineación horizontal de una carretera basándose en las trayectorias de vehículos equipados con GPS de alta precisión. Para ello, se tomaron datos con un vehículo equipado con un GPS con un intervalo de 0.1 segundos bajo diferentes condiciones de velocidad (80, 90 y 100 km/h) en una carretera convencional, en ambos sentidos de circulación, lo que suponen 6 trazadas. La toma de datos se realizó en tramos de carreteras con las siguientes restricciones:

- Zona no urbana con entorno no urbanizado.

- Sin edificios altos, árboles, pasos superiores u otras construcciones que pudieran suponer interferencias en la señal del GPS.
- Con disponibilidad de una estación de control para medir el diferencial del GPS.
- Bajo volumen de tráfico: $IMD \leq 10000$ vh/día
- Carreteras pavimentadas y marcadas con línea de ancho constante para un mejor seguimiento de la línea central.
- Sin stops o intersecciones señalizadas en menos de 0.8 km desde la curva para poder conducir a velocidad constante.
- Radio de la curva menor de 1000 m y longitud de la curva mayor de 50 m.

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

Asimismo, estudiaron la diferencia entre utilizar GPS con una cadencia de toma de datos de 0.1 segundo con los resultados obtenidos al tomar datos con una cadencia de 0.5 y 1 segundos. Concluyeron que no hay diferencia significativa entre los resultados obtenidos con datos cada 0.1 segundos (diferencia con geometría real de 1.55 % de media) y cada 0.5 segundos (diferencia con geometría real de 1.40 % de media). Sin embargo, se detectó una diferencia mayor (2.34 % de media) entre las características reales y las obtenidas a partir de los datos tomados con un intervalo de 1 segundo.

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

Los datos tomados por el GPS fueron corregidos de diferentes formas y los puntos del eje de la carretera estimados por un algoritmo de cálculo que desarrollaron basado en la simetría de las dos trazadas realizadas por el vehículo (una en cada sentido de circulación). Para encontrar los distintos puntos que forman el eje de la carretera el procedimiento consistió en, para cada punto de una trazada, encontrar el punto de la trazada en sentido contrario más próximo a aquél y calcular el punto medio entre ambos. Este procedimiento implica cierto error ya que hay que tener en cuenta que, según presentan en su estudio, la distancia entre estos dos puntos "cercaños" llega a ser de 10.6 m.

Finalmente, una vez obtenidos los puntos del eje central propuesto, la alineación de la carretera se define por medio de esplines cúbicos paramétricos. La restitución de la geometría resultado del estudio fue comparada con el estado de alineaciones del

proyecto de construcción de dicha carretera, concluyendo que el 71 % de las diferencias entre los puntos reales y los estimados eran inferiores a 0.50 m y que la máxima distancia y la distancia media eran de 1.00 y 0.40 m respectivamente.

Lipar et al. (2011) mostraron un procedimiento para la estimación de la curvatura del eje central de una carretera a partir de datos procedentes de GPS, y por tanto no equidistantes. El primer paso fue ajustar los datos a cada sección de la carretera mediante B-splines y generar vértices equidistantes de la polilínea de la curva ajustada, con lo que posteriormente trabajar. Después, se aplicó la proyección estereográfica de los tramos de polilínea elegidos en la esfera unidad. A partir de mínimos cuadrados, se identificó el plano de mejor ajuste para los puntos y el círculo producto de la intersección del plano y la esfera unidad. La proyección estereográfica de este círculo de nuevo al plano ecuatorial da como resultado el correspondiente arco circular y la curvatura.

3.1.2. Toma de datos relacionados con factor humano y vehículo

Como se ha citado anteriormente, no sólo las características del trazado de la vía y de la infraestructura influyen sobre la elección de la velocidad por parte de los conductores, sino que una alta variabilidad de la velocidad viene explicada por otras variables como son las características físicas, sociológicas y psicológicas del conductor y las características del viaje y del vehículo.

La obtención de datos válidos relacionados con estas variables es una tarea complicada ya que el propio método de toma de datos puede influir en el conductor, dando como resultado datos que no se ajustan completamente a la realidad.

Para el registro de datos físicos y sociológicos del conductor y características del vehículo y del viaje se han utilizado distintas metodologías, que varían desde entrevistas al conductor hasta visualización de videos.

Wasielowski (1984) se basó en la visualización de las fotografías obtenidas durante la toma de velocidad para la caracterización aproximada de las distintas variables. Entre estas variables destacan los datos relacionados con el conductor, como edad y sexo, el tipo de vehículo y la presencia o no de pasajeros.

Un método similar fue utilizado por Williams et al. (2006). En este estudio se registraron las matrículas de los vehículos que circulaban por el tramo de carretera en el que se estaban midiendo velocidades. Los vehículos también fueron grabados en video pero no con la suficiente resolución como para identificar la edad del conductor. Por ello, llevaron a cabo un proceso que consistió en, tras identificar la matrícula, obtener los datos del conductor asociado a esa matrícula a partir de los datos de la administración competente. Así, se obtuvieron datos de la edad y sexo del conductor, experiencia en la conducción e historial de accidentes y sanciones. Entre todos los datos se desechaban aquellos en los que el sexo y edad aproximada del conductor observado en los videos no coincidía con los datos oficiales.

Sin necesidad de fotografías o de videos, puede obtenerse los datos ya mencionados a partir de entrevistas directas a los conductores. Esta forma de proceder fue utilizada por Jorgensen y Polak (1993). En su estudio, la toma de datos

consistió en la medición de la velocidad de los vehículos que circulaban por un tramo de carretera, a los que posteriormente se les paraba y se les realizaba una pequeña encuesta para obtener datos como la edad, el sexo y la experiencia en la conducción del conductor.

Del mismo modo, Lajunen et al. (1997) registraron datos sociológicos de los conductores a partir de una entrevista previa al estudio. Los datos obtenidos estaban relacionados con la fecha de nacimiento, fecha y tipo de permiso de conducir, kilometraje total y kilometraje medio al año, número y tipo de accidentes en los que el conductor ha estado implicado y el número y tipo de sanciones recibidas.

La obtención de datos a partir de entrevistas a los conductores es lo que se denomina autoinformes. Con ellos se pueden obtener datos sobre el historial de accidentes y sanciones, pero también datos subjetivos relacionados con la psicología del conductor.

La mayoría de las investigaciones del ámbito de la psicología sobre el comportamiento de los conductores que conducen a una alta velocidad, por ejemplo, se basan en autoinformes sobre este comportamiento y las actitudes de los conductores.

Un ejemplo de este tipo de estudios es el realizado por Schwebel et al. (2007). En este estudio, una muestra de 101 conductores con una edad de 75 años o más completaron autoinformes con diferentes medidas de personalidad, temperamento y historial de conducción.

Los cuestionarios utilizados fueron:

- la versión corta del *Driving Behavior Questionnaire*, que es un inventario de 24 ítems que abarca tres factores relacionados con el comportamiento de los conductores como son las sanciones, los errores y los fallos en la conducción.
- la versión corta del *Adult Temperament Questionnaire* que es una medida de 77 ítems dando como resultado 19 escalas de 4 factores: extroversión, afecciones negativas, autocontrol y orientación.
- la escala *Sensation-Seeking Scale – Form V*, que es la medida de 40 ítems.

Fildes et al. (1991) utilizaron también la metodología basada en autoinformes. En este caso se utilizaron para el estudio de accidentes. Los conductores dieron información sobre el número de accidentes en los que habían estado implicados y las circunstancias en las que se produjeron.

3.1.3. Toma de datos de velocidades

En los estudios relacionados con la velocidad desarrolladas por los conductores en un tramo de carretera y concretamente en los estudios realizados con el objetivo de desarrollar modelos para la estimación de la velocidad de operación, se han utilizado distintos dispositivos de toma de datos, en su mayor parte datos puntuales.

3.1.3.1. Toma de datos puntuales

Generalmente, el dispositivo empleado en la recogida de datos sobre velocidades de vehículos es una pistola radar utilizada de forma manual. Sin embargo, la utilización de este dispositivo presenta tres problemas a considerar.

En primer lugar, para registrar la velocidad de un vehículo utilizando alguno de los modelos de pistola de radar, un observador debe leer la pantalla LCD del dispositivo y otra persona escribir los datos leídos; como resultado, se puede introducir un error humano en el proceso de recogida de datos. En segundo lugar, la medida de la velocidad con una pistola de radar en secciones curvas tiene cierto grado de inexactitud debido a que el ángulo registrado es diferente de cero y cambia a lo largo de la curva (error de coseno). Por último, la presencia de personal puede afectar considerablemente al conductor variando su comportamiento y elección de la velocidad.

Este método ha sido utilizado por Gibreel et al. (2001) para establecer el efecto de la combinación de alineaciones 3D en la velocidad de operación de los vehículos, ubicando las mediciones de velocidad en cinco puntos a lo largo de cada dirección. Con el fin de intentar evitar los problemas mencionados, los observadores se localizaron donde el efecto de coseno era considerado mínimo y, al mismo tiempo, fuera del campo de visión de los conductores para asegurar que su presencia no influyera en el comportamiento de los conductores.

Conociendo los posibles errores presentes en la utilización de pistolas radar, Fitzpatrick et al. (2000) utilizaron además sensores piezoeléctricos en el pavimento conectados con contadores/clasificadores de tráfico para la modelización de la velocidad en recta y en curva. Estos dos tipos de dispositivos de medida de velocidad fueron seleccionados después de distintos ensayos en los que se compararon distintos dispositivos.

Para curvas horizontales, las velocidades fueron medidas en el centro de la curva horizontal y en el punto medio de la recta precedente. En la figura 3.1 se muestra la localización tanto de los contadores/clasificadores de tráfico como de las pistolas radar.

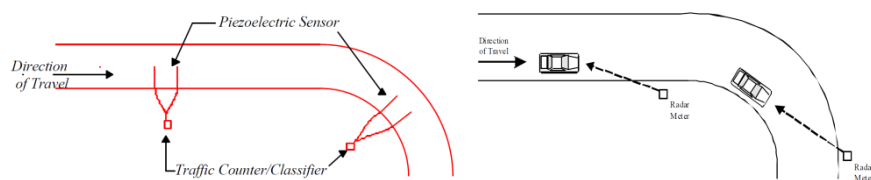


Figura 3.1 Localización de los dispositivos de medida en curva horizontal

Al utilizar pistolas radar los operadores se escondieron donde fuera posible visualizar el punto de medida de velocidad y a la vez ocultos para evitar modificar el comportamiento de los conductores. Además, las pistolas radar fueron manipuladas para que los vehículos con detectores de radar no evitaran la toma de datos.

Sin embargo para la toma de datos de velocidades destinadas al estudio de la deceleración y aceleración, se utilizaron pistolas Light Detection and Ranging (Lidar). Lidar es una herramienta multiobjetivo que se ha convertido en una alternativa a las pistolas radar convencionales. El uso de Lidar en la toma de datos de velocidades tiene dos ventajas principales. En primer lugar, Lidar puede medir la distancia a un vehículo a la vez que la velocidad mientras que las radar sólo miden la velocidad. La segunda ventaja reside en que la señal transmitida por las Lidar viaja en línea recta, al contrario que la de la radar que sigue patrones cónicos, haciendo más fácil el apuntar al vehículo cuya velocidad se pretende medir. Además, el rayo laser más estrecho es más difícil de detectar por los detectores de radar.

La información que los dispositivos Lidar proporcionan (distancia y velocidad) permiten localizar las mediciones de velocidad en puntos conocidos y, de esta forma, estudiar la deceleración y aceleración.

La figura 3.2 muestra la disposición utilizada en este estudio para la utilización de tres Lidar en la toma de datos de velocidad para el estudio de la deceleración y aceleración.

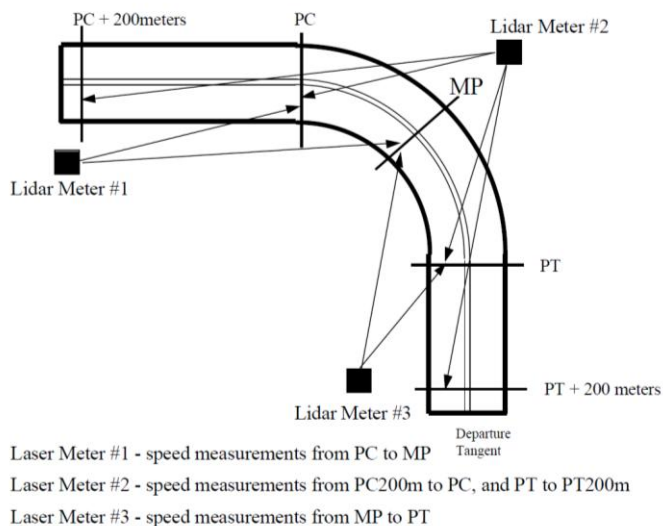


Figura 3.2 Disposición de toma de datos para el estudio de deceleración/aceleración

Castro et al. (2010), en lugar de utilizar pistolas radar o lidar, tomaron datos puntuales de velocidad mediante radar, evitando así el posible error humano de toma de datos. Con este dispositivo registraron la velocidad de, al menos, 40 vehículos en flujo libre en 200 localizaciones diferentes de la red de carreteras de Colombia. Los puntos de toma de datos se localizaron 200 metros antes, en el inicio, en el medio y en el final de cada curva horizontal. A partir de estos datos, calcularon el percentil 85 de la velocidad en cada punto, con los que validaron modelos para la estimación de la velocidad de operación en curva calibrados con datos de otros

países y calibraron nuevos modelos para la estimación de esta variable en curvas de radio inferior a 300 metros y diferentes combinaciones del trazado en alzado.

Por otra parte, Misaghi y Hassan (2005) utilizaron, para estudiar los cambios de velocidad en curvas de carreteras de dos carriles, contadores/clasificadores electrónicos colocados en cinco puntos diferentes de cada una de las curvas del tramo de prueba. Además, para verificar el efecto en el comportamiento de los conductores de la toma de datos de velocidad manual, tomaron también datos en paralelo con pistolas de radar durante 2 horas. Con este ensayo llegaron a la conclusión que las velocidades registradas en este caso eran menores que en el resto, siendo la diferencia estadísticamente significativa en la mitad de los puntos estudiados.

Schurr et al. (2002) llevaron a cabo una investigación cuyo fin era proporcionar una serie de directrices para la determinación de las velocidades de diseño y de operación en curvas horizontales de carreteras de dos carriles. Su objetivo era investigar la relación entre las velocidades de diseño, de operación y límite en las curvas horizontales habituales. Para ello, colocaron un detector en el tramo de aproximación a la curva y otro en el centro de la misma. Ambos fueron ubicados en el centro del eje de carril bajo una cubierta de alto impacto de poliuretano-elastómero. La cubierta tenía una textura y color que la hacían inapreciable para los conductores, con lo que su influencia en el comportamiento de los mismos era mínima.

Con todos los dispositivos de datos mencionados en este apartado es posible recoger una amplia muestra de datos de velocidad (generalmente alrededor de 100 datos en cada punto) con mayor o menor influencia en el comportamiento de los conductores. Sin embargo, con todos estos procedimientos únicamente se consigue obtener datos de velocidades puntuales en un segmento de carretera, aunque como en el caso de las pistolas Lidar este número de datos sea amplio.

La limitación más importante de los modelos basados en datos puntuales de velocidad es que los datos no son tomados en los puntos de inicio y final de la deceleración y aceleración. Esto provoca que los perfiles de aceleración y deceleración no representen el verdadero comportamiento de los conductores. Además, con estos métodos las longitudes de deceleración y aceleración no pueden determinarse y los ratios reales no pueden ser obtenidos con total precisión.

3.1.3.2. Toma de datos continuos

En general, la operación de los vehículos se puede caracterizar por un modelo de perfil de velocidades y aceleraciones/deceleraciones, obtenido de los ensayos de campo. Para ello, es preferible tener datos continuos de velocidad y no, únicamente, datos puntuales. Con estos perfiles es posible predecir el comportamiento de los vehículos a lo largo de un trazado, en función, fundamentalmente, de sus características geométricas.

Para obtener estos perfiles continuos puede realizarse una recogida de datos de una muestra de vehículos basada en un seguimiento pasivo por medio de dispositivos GPS.

De hecho, Jiang y Li (2001) han analizado las características del tráfico en tramos de obras mediante GPS obteniendo perfiles de velocidades, aceleraciones y deceleraciones. Así como también las demoras del tráfico y la longitud de las retenciones en estas zonas.

Del mismo modo, Wang et al. (2006) estudiaron la influencia del entorno de zonas urbanas de baja velocidad en las velocidades de los conductores con vehículos equipados con GPS. Los autores desarrollaron modelos de velocidad en tramos de zonas urbanas basados en el trazado de la vía, las características de la sección transversal, las características de las aceras y los usos del suelo adyacente.

Otro método que se ha utilizado en diferentes estudios y con el que se obtienen datos continuos de velocidad es el vehículo instrumentado.

Yang y Hassan (2008) y Hu y Donnell (2008) estudiaron el comportamiento de los conductores a partir de datos obtenidos mediante un vehículo instrumentado. Sin embargo, los resultados y el posible desarrollo de los modelos de velocidad pueden estar condicionados por el equipamiento del vehículo y el número de las observaciones. Además, la muestra no es suficientemente representativa del comportamiento real de los conductores ya que los conductores que participaron en la toma de datos eran voluntarios conocedores de los objetivos de la investigación.

Al igual que los anteriores, existe otro método para evitar las deficiencias de la toma de datos puntuales obteniendo perfiles continuos de velocidad, es el caso de la grabación y el procesamiento de videos. Sin embargo, este método sólo es útil para estudios locales y segmentos de carretera reducidos.

Finalmente, cabe destacar la utilización de los simuladores de conducción para la obtención de perfiles continuos de velocidad.

Bella (2008) presentó un estudio para predecir el percentil 85 de los ratios de deceleración y aceleración basados en datos recogidos en la transición recta-curva-recta en un simulador de conducción. En este estudio presentó los resultados del estudio de 3 tramos de carreteras de dos carriles de circulación con un intervalo de toma de datos de 5 m.

Los participantes en el estudio fueron elegidos de forma que haya cierto equilibrio entre genero (60 % hombre y 40 % mujeres) y con un rango de edad entre 23 y 60 años. Fueron seleccionados de acuerdo con las siguientes características: no experiencia en simuladores de conducción, con, como mínimo, 4 años de experiencia en la conducción y una media anual de distancia conducida de al menos 2500 km.

El vehículo del simulador fue un vehículo ligero de clase media estándar, tanto respecto a sus dimensiones como equipamiento mecánico, con cambio automático.

A pesar de la exhaustiva elección de los conductores y el vehículo utilizado en el simulador, hay que tener en cuenta que se trata de una experiencia mediante simulador de conducción y no de datos reales tomados en campo, por lo que no se corresponde completamente con el comportamiento real de los conductores.

3.2. LA VELOCIDAD. CONCEPTOS GENERALES

En el estudio del comportamiento de los conductores una de las variables más importantes es la velocidad a la que circulan y sus variaciones. Este concepto de velocidad a la que operan los conductores es conocido como velocidad de operación, por lo que es en ella y en las formas de estimarla en lo que se va a basar principalmente el presente estado del arte. Sin embargo, antes de profundizar en este concepto es importante tener una visión general de los distintos conceptos relacionados con la velocidad.

3.2.1. Velocidad de diseño

El concepto de velocidad de diseño fue inicialmente desarrollado en EE.UU. en los años 30 del siglo XX como un mecanismo para diseñar carreteras convencionales en planta, permitiendo a la mayoría de usuarios desarrollar a lo largo de dichas vías una velocidad uniforme. A lo largo de la historia se ha ido modificando el concepto de velocidad de diseño y el modo en el cual se tiene en cuenta en los diseños.

Una de las primeras definiciones más completas, y que prácticamente se ha mantenido invariable hasta la actualidad es la propuesta por la AASHTO en 1.954, definiendo la velocidad de diseño como la *“máxima velocidad segura que puede ser mantenida sobre una sección específica de la vía cuando las condiciones son lo suficientemente favorables para que sean los factores del diseño de la vía los que condicionen la conducción”*. Junto a esta definición añadió las siguientes premisas:

- La velocidad de diseño escogida debe ser congruente con la topografía, usos del suelo adyacente y clasificación funcional de la vía.
- Todos los aspectos pertinentes de la vía deben ser diseñados teniendo en cuenta la velocidad de diseño con el objetivo de obtener un diseño equilibrado.
- Siempre que sea factible, deberán usarse valores superiores a los mínimos.
- La velocidad de diseño escogida deberá ser consistente con las expectativas de los conductores.
- La velocidad de diseño escogida deberá ajustarse a los objetivos y hábitos de prácticamente la totalidad de los conductores.

Aunque en la anterior definición se introdujo el término de “máxima velocidad segura”, se indicó igualmente que las velocidades de operación y límite podían ser superiores sin necesariamente comprometer la seguridad.

En 1.997, Fambro et al. recomendaron revisar la definición de velocidad de diseño para el Green Book, manteniendo las cinco premisas anteriores. La nueva definición recomendada era *“la velocidad de diseño es una velocidad seleccionada para diseñar determinados aspectos de la vía”*. El término “seguridad” se eliminó de la definición con el objetivo de evitar la percepción de que velocidades superiores a la velocidad de diseño no fueran seguras. Esta definición se adoptó por la AASHTO en el Green Book del año 2.001. Respecto a la selección de una velocidad de diseño adecuada, la AASHTO dice 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 menor 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.

La postura de la AASHTO refleja el intento de adaptar la metodología de diseño al concepto de velocidad de diseño. Sin embargo, no se proporciona una guía cuantitativa que, por ejemplo, indique el número de tramos consecutivos con

velocidades de diseño superior a la media de la vía que incitan al conductor a acelerar, o el tramo previo en el que se debe reducir la velocidad de diseño con el objetivo de que el conductor no deba realizar un cambio brusco en la velocidad.

A continuación, se muestra la tabla 3.1 con las recomendaciones de la AASHTO para diferentes tipos de vías y condiciones orográficas, en km/h.

	Llano	Ondulado	Montañoso
Arterial	100-110	80-100	60-80
Colector	60-100	50-80	30-60
Local	50-80	30-60	30-50

Tabla 3.1 Recomendaciones de la AASHTO para la elección de velocidad de diseño

Existen otras muchas recomendaciones para las velocidades de diseño de diferentes vías, siendo esta la más destacada.

Finalmente, cabe mencionar las consideraciones realizadas por Rocci (2010) respecto a la que la velocidad de diseño debe ajustarse a los deseos y costumbres de casi todos los conductores, y comprender la casi totalidad de las velocidades deseadas por estos, donde resulte factible. Así, no sería práctico acomodar las velocidades deseadas por todos los conductores, pues los deseos de algunos de estos son irracionalmente veloces. Para ser razonables, sólo hay que acomodar a casi todos los conductores. Los más rápidos deben soportar de buen grado un cierto grado de incomodidad en sus maniobras.

Sólo se puede admitir que una fracción pequeña de conductores muy rápidos se sitúe fuera de unas condiciones límite de seguridad, especialmente en lo relativo a maniobras de emergencia. Para los demás conductores, las condiciones de seguridad no deben resultar excesivamente restrictivas.

Por otra parte, en muchos casos, referirse a percentiles altos de la distribución de velocidades resulta excesivo. Así ocurre con la velocidad de un vehículo lento al que se pretende adelantar, y a partir de la cual se inicia una maniobra de adelantamiento desde una posición de seguimiento: esta velocidad tiene que ser forzosamente reducida. Adoptar valores superiores conduce a unas distancias de adelantamiento muy largas.

3.2.2. Velocidad de proyecto

La Instrucción de Trazado 3.1 IC 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: AP-120, AP-100, AP-80.
- Autovías: AV-120, AV-100, AV-80.
- Vías rápidas: R-100, R-80.
- Carreteras convencionales: C-100, C-80, C-60, C-40.

También clasifica las vías en dos grupos:

- Grupo 1: Autopistas, autovías, vías rápidas y carreteras convencionales C-100.
- Grupo 2: Carreteras convencionales C-80, C-60 y C-40.

En la nomenclatura utilizada el número representa la velocidad de proyecto, escogida está en la fase de diseño y entendiéndola 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. En palabras de Rocci (2010), la velocidad de proyecto de un tramo representa la oferta mínima del tramo en materia de velocidades específicas.

Aunque la Instrucción de Trazado no impone condiciones específicas a la hora de seleccionar la velocidad de proyecto, sí establece ciertas recomendaciones para su elección y adecuación al entorno.

Se define velocidad de planeamiento de un tramo como la media ponderada de las velocidades específicas de todos los elementos que lo forman. De este modo, la Instrucción de Trazado recomienda comparar la velocidad de proyecto con la velocidad de planeamiento del tramo diseñado y con las velocidades de proyecto y planeamiento de los tramos adyacentes, con el objetivo de adecuar lo máximo posible el tramo diseñado al entorno.

Esta Instrucción no indica valores específicos de las velocidades de proyecto y planeamiento, pero sí establece los criterios que en los estudios de carreteras deben tenerse en cuenta para su elección. En ella se recomiendan los siguientes factores:

- Condiciones topográficas y del entorno.
- Consideraciones ambientales.
- Consideración de la función de la vía dentro del sistema de transporte.
- Homogeneidad del itinerario o trayecto.
- Condiciones económicas.
- Distancias entre accesos y su tipo.

Como explica Rocci (2010), los conductores escogen una velocidad en su conducción basada en la percepción que tienen de la vía. Así, si esta presenta unas características que permiten a los conductores circular a mayor velocidad, el comportamiento general de estos será el de aumentar su velocidad. En el caso contrario, los conductores circularán a menor velocidad.

En muchas ocasiones, la velocidad de proyecto es menor que aquella a la que los conductores piensan que pueden circular de forma segura. En estos casos, el diseño de la vía obliga a que los conductores adapten su velocidad a la que la vía permite en condiciones seguras, mediante la instalación de elementos de ayuda o coacción a la conducción, como por ejemplo señales de curva peligrosa o limitaciones de velocidad.

3.2.3. 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 en la práctica se la suele identificar con el 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 operación de los conductores es la velocidad que los vehículos que ellos conducen 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.

Las variables que pueden condicionar un fenómeno tan complejo como la velocidad de operación son de diversa índole:

- Geométricas asociadas al trazado de la vía. Tales como el radio de una curva o la longitud de una recta.
- No geométricas también asociadas al trazado (y de consideración más complicada en los modelos). Ejemplos: ancho de los carriles, visibilidad lateral, etc.
- Variables relacionadas con los conductores individuales (las más difíciles de identificar y estimar, y las causantes de la variabilidad residual en los modelos de predicción de las velocidades de operación). Se trata fundamentalmente de variables asociadas a la psicología y a las condiciones particulares de cada conductor.

3.2.4. Velocidad específica

La Instrucción de Trazado 3.1 I-C 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.

Como menciona Rocci (2010), la velocidad específica de los distintos elementos de la vía representa la oferta que esta hace a los conductores que la interpreten correctamente. Sin embargo, en la práctica, el comportamiento de los conductores no siempre se atiene a las hipótesis subyacentes a la definición de la velocidad específica. Esta tiene que corresponder a parámetros de seguridad y de comodidad, los cuales deben ser comprobados en cada uno de los elementos de manera que su velocidad específica no sea inferior a la de operación; de lo contrario uno u otra, o ambas, deben ser modificadas.

3.2.5. Velocidad de diseño inferida

El método de emplear una velocidad de diseño para definir las geometrías de los elementos constituyentes de la vía está basado únicamente en la percepción que el diseñador tiene sobre la vía, dependiendo ligeramente de las guías proporcionadas por las diferentes normativas.

Los métodos de diseño basados en las velocidades de operación pretenden que el ingeniero diseñe teniendo en cuenta el comportamiento del conductor frente a la vía.

Cuando los vehículos circulan por una vía, no ajustan su velocidad en función de la velocidad de diseño impuesta por el diseñador, sino que tienen su propia percepción sobre las características de la vía y ajustan su velocidad a dichas características. Ése es el origen de la velocidad de operación.

La velocidad de diseño inferida es un concepto intermedio entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación. De igual modo que la velocidad de diseño es la base para modelar las características geométricas de la vía, la velocidad de diseño inferida es la velocidad de diseño que se corresponde a los parámetros geométricos que finalmente han resultado para un tramo particular, no haciendo referencia a la velocidad de diseño de la misma, la cual será siempre igual o inferior.

La velocidad de diseño inferida es cercana a la velocidad de operación, y por ello se ha llegado a emplear como variable independiente para modelar la velocidad de operación.

3.2.6. 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 ITE (1993) (Institute of Transportation Engineers) 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.

Según la propuesta presentada por Rocci y García (2006), en las carreteras españolas, el grado de cumplimiento de los límites de velocidad, genéricos y específicos, es realmente bajo. De hecho, la velocidad del percentil 85 supera al límite en unos 10-20 km/h.

La mayoría de los conductores considera segura y razonable la velocidad del percentil 85 con flujo de tráfico libre. Además, la inmensa mayoría de los usuarios no tienen accidentes, y la velocidad por debajo de la cual circula la mayoría (velocidad de operación) se tiene que aproximar necesariamente a la velocidad adecuada de la carretera. Por tanto, se podría establecer como límite de velocidad el percentil 85 o 90 de la distribución de velocidades en condiciones de flujo libre.

3.2.7. 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.

El Highway Capacity Manual (2000) 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.

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”*. Sugirió que estaba influenciada por factores como el propósito del viaje, la proximidad a áreas urbanas, o el tiempo que llevaba en la carretera. Entre las variables de las que dependía dicha velocidad también estaban otras de índole geométrica, tales como la curvatura media.

3.3. LA 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 percentil 85 es el más empleado debido a que representa aproximadamente la velocidad considerada segura a la que operan los conductores. Sin embargo, se han llevado a cabo algunas investigaciones considerando otros percentiles, como posteriormente se comentará. De hecho, diferentes estudios (Tarris et al., 1996; Fitzpatrick et al., 2003; Figueroa y Tarko, 2007) han considerado la utilización de la distribución completa de la velocidad de operación.

3.3.1. Distribución de la velocidad de operación

La velocidad desarrollada en la carretera es elegida por los conductores y, por tanto, diferentes conductores seleccionarán diferentes velocidades. Esta elección depende de un gran número de variables como son las limitaciones del vehículo, las condiciones de la carretera o las habilidades del conductor, entre otras. Por tanto, un único valor de la velocidad no puede representar adecuadamente todas las velocidades registradas en un tramo de carretera. Esta información viene proporcionada por la distribución de velocidades, que suele asumirse como una normal. Esta premisa permite llevar a cabo mayor número de análisis y estudios estadísticos.

A pesar de que una variable como la velocidad se distribuya de forma normal, las propiedades de la distribución pueden variar según, en este caso, el tramo de carretera seleccionado. Así, la distribución de la velocidad en rectas es diferente de la distribución de la velocidad en curvas.

Las propiedades de esta distribución permiten que se pueda caracterizar mediante únicamente dos características, la media y la desviación típica. A pesar de ello, en los estudios relacionados con la velocidad de operación los característicos más utilizados son los percentiles. Esto es debido a que se ha llegado a la conclusión de que cada percentil estudiado hace referencia a un tipo de comportamiento en cuanto a la conducción.

Así, de la misma forma que los diferentes percentiles de velocidad de operación pueden ser modelados mediante expresiones que consideran diferentes variables, como se verá más adelante, también el conductor representativo de cada una de estas velocidades puede caracterizarse por diversos parámetros, identificando los distintos estilos de conducción.

Un ejemplo de esta conclusión es el diferente comportamiento de los percentiles 85 y 95 de operación en una pendiente. A medida que aumenta la pendiente de una vía, la velocidad de percentil 85 disminuye. Sin embargo, la de percentil 95 no lo hace (en los intervalos habituales de variación). Esto es debido a que los vehículos operantes en el rango entre el 85 % y el 95 % presentan unas prestaciones mecánicas mucho mayores que el resto.

Cada uno de los diferentes percentiles presenta diferentes relaciones y modelos de estimación. Ello implica que un modelo de regresión válido y calibrado para estimar la velocidad de operación de percentil 85 no será válido para estimar la velocidad de operación de un percentil diferente, puesto que las variables significativas pueden ser diferentes.

El percentil 85 es el más empleado debido a que representa aproximadamente la velocidad considerada segura a la que operan los conductores, tal y como se desprende de las definiciones anteriores.

Debido a que este percentil es el más estudiado de la velocidad de operación (por lo que existe un gran número de relaciones y modelos), es frecuente que a la hora de diseñar teniendo en cuenta la operación de los vehículos únicamente se dispongan de relaciones o métodos que hagan referencia a este parámetro.

Para solventar un diseño infraestimado, se suelen emplear velocidades de diseño obtenidas a partir de la velocidad de percentil 85, a la que se le ha sumado 10 ó 20 km/h, obteniendo así una velocidad de operación de mayor percentil y validando el diseño.

El percentil 95 está considerado también (aunque en menor medida que el anterior) como un percentil representativo de la velocidad máxima segura a la que pueden circular los vehículos. Por ello, también se recurre a dicho percentil en ocasiones para completar el diseño de un elemento geométrico. Por ejemplo, el dimensionamiento de los acuerdos verticales convexos, para evitar pérdidas de visibilidad, suelen acomodarse para cumplir los requerimientos mínimos de visibilidad con el percentil 95 de la velocidad de operación. Otros estudios indican que si se quiere proporcionar al trazado un nivel de seguridad adecuado, se debe diseñar con un percentil de velocidad del 99.7. Sin embargo, se emplea el 95 porque este ya proporciona un nivel de seguridad suficientemente adecuado, y emplear el otro supone sobredimensionar en exceso las vías.

El percentil 50 de la velocidad de operación no tiene importancia desde el punto de vista del diseño, empleándose más como una variable estadística. Debido a que su valor no viene condicionado por características operacionales, mecánicas de los vehículos o psicológicas de los conductores, su variabilidad es mucho mayor que la de los percentiles anteriores.

Hay estudios que han desarrollado fórmulas empíricas de todos los percentiles de la velocidad de operación, con el objetivo de buscar un modelo de predicción del perfil completo de la velocidad de operación.

Sin embargo, este modo de proceder (al menos al nivel de los estudios realizados hasta hoy en día), considera ciertas hipótesis que no son siempre aceptables. La

hipótesis más perjudicial es considerar que sobre todos los percentiles actúa un modelo análogo de regresión de la velocidad de operación. Esta forma de proceder convierte el cálculo en uno mucho más simplista, despreciando no linealidades entre los diferentes percentiles y conduciendo a posibles errores en las conclusiones, o a una fiabilidad muy reducida de los resultados.

Por otro lado, el hecho de considerar un perfil de velocidades del modo anterior implica prácticamente la obligatoriedad de asumir que el perfil de velocidades sigue una distribución estadística determinada, generalmente normal como ya se ha citado, conduciendo a que el resultado final sea equivalente prácticamente a ajustar cierto percentil de velocidades (como el 50) y, posteriormente, obtener el resto a partir de dicho valor y de su desviación típica. Mediante esta forma de proceder no se obtienen realmente los percentiles de operación, aunque sí una aproximación.

3.3.2. Variables condicionantes de la velocidad de operación

Se han llevado a cabo gran cantidad de estudios con el objetivo de identificar las variables o aspectos con mayor influencia sobre la velocidad de operación, con el fin de ajustar mejor el comportamiento de los modelos de velocidad de operación a la realidad. En este apartado se presentan, clasificadas en categorías, las variables más influyentes sobre la velocidad de operación.

3.3.2.1. Factores externos a la vía

Los factores enunciados en este apartado representan la mayor parte de las condiciones de las que se sabe (o se supone) que tienen influencia sobre la velocidad de operación, pero sobre las que no es posible ejercer ningún control actuando únicamente en la infraestructura. En este grupo se incluyen desde las condiciones de luminosidad o atmosféricas hasta las características de los conductores.

Condicionantes meteorológicos

Se han realizado numerosos estudios encaminados a determinar la influencia de esta variable sobre la velocidad de operación. Los condicionantes meteorológicos estudiados son, en la mayoría de estudios, el efecto de una ligera o fuerte lluvia, aunque también se ha llegado a considerar el efecto de una nevada.

La lluvia (o la nieve, en su caso) pueden afectar a la velocidad de operación desde dos puntos de vista. Por un lado, suponen una dificultad a la visibilidad del conductor, que especialmente se agudiza cuando el efecto meteorológico en cuestión es de gran intensidad. Por otro lado, la lluvia y, de forma mucho más agresiva, la nieve alteran las condiciones del pavimento, de una forma mucho menos dependiente de la intensidad del fenómeno, pero con efectos mucho más apreciables.

La conclusión más extendida es que condiciones meteorológicas no producen alteraciones significativas sobre la velocidad de operación. Existen unos mínimos estudios que indican que unas condiciones meteorológicas muy adversas producen una disminución ligera de la velocidad de operación.

Según un estudio desarrollado por Blackburn et al. (1.975), adaptando intervalos de confianza del 95 %, la velocidad del pavimento seco podía considerarse superior a la desarrollada sobre el pavimento húmedo en una magnitud muy pequeña: 3.2 ± 2.4 km/h.

Posiblemente, el estudio más completo acerca de la influencia de la meteorología sobre la velocidad de operación fue desarrollado por Ibrahim y Hall (1.994). Dicho estudio evaluó la influencia de la lluvia y de la nieve con diferentes intensidades, llegando a las siguientes conclusiones:

- Lluvia ligera: descenso de unos 2 km/h en la velocidad de operación.
- Lluvia fuerte: descenso de entre 5 y 10 km/h.
- Nieve ligera: descenso de unos 3 km/h.
- Nieve fuerte: descenso entre 38 y 50 km/h.

De las anteriores conclusiones se puede observar cómo la intensidad del fenómeno representa un factor fundamental. El hecho de que una fuerte nevada implique un descenso tan fuerte radica en el hecho de que dicho fenómeno tiende a la formación de placas de hielo en la vía y a la opacidad del parabrisas, que son advertidos como un peligro muy importante por el conductor.

Sin embargo, estadísticamente esta variable no ha presentado una importante influencia sobre la velocidad de operación por lo que los modelos destinados a estimarla no suelen considerarla.

Condicionantes lumínicos

Al igual que con las anteriores características, se han realizado diversos estudios encaminados a determinar si la luminosidad (cuando no está causada por fenómenos meteorológicos, en cuyo caso el comportamiento de los conductores se encuentra recogido por los estudios meteorológicos) provoca cierta influencia sobre la conducción.

En la mayoría de los estudios realizados, se puede observar una ligera disminución de la velocidad de operación en condiciones de baja luminosidad, aunque esta no es estadísticamente significativa en la mayoría de estudios.

El estudio llevado a cabo por Oppenlander en 1.966 reveló que las velocidades de operación fuera del recorrido urbano eran aproximadamente entre 2 y 8 millas por hora superiores a las velocidades desarrolladas por la noche.

Un estudio más reciente de Ye et al. (2001) analizó el comportamiento de los conductores en vías de 4 y 6 carriles en diferentes condiciones: por el día y por la noche, y para ligeros y pesados. Llegó incluso a calibrar diferentes modelos de estimación de la velocidad de operación para cada una de las combinaciones posibles (tabla 3.2).

Modelo	Relación	R ² (%)
Ligeros/día	$v_{cd} = 61.7 - 3.31 \cdot t_d + 5.8 \cdot V_c + 11.8 \cdot r + 6.8 \cdot f - 8.3 \cdot n$	96.6
Pesados/día	$v_{td} = 58.7 - 377 \cdot t_d + 6.42 \cdot V_t + 2.98 \cdot r + 4.42 \cdot f - 7.27 \cdot n$	86.9

Ligeros/noche	$v_{cn} = 59.9 - 1.89 \cdot t_n + 0.124 \cdot r + 8.29 \cdot f - 4.95 \cdot n$	91.0
Pesados/noche	$v_{tn} = 58.0 - 2.16 \cdot t_n + 1.23 \cdot V_t + 2.47 \cdot r + 1.37 \cdot f$	87.0

Donde:

i : tipo de vehículo (c vehículos ligeros, t vehículos pesados)

V : velocidad límite (1 para 65 mi/h, 0 para 55 mi/h)

t : porcentaje de pesados (t_d día, t_n noche)

r : uso del suelo (1 rural, 0 urbano)

f : clase funcional de la vía (1 autopista, 0 otros)

n : número de carriles (1 para seis carriles, 0 para cuatro)

Tabla 3.2 Modelos de Ye et al. (2001)

Condicionantes orográficos

Así como las condiciones meteorológicas y lumínicas han sido ampliamente estudiadas y parametrizadas, las condiciones orográficas han sido estudiadas, pero no existen unas conclusiones generalizadas de las mismas.

La orografía actúa influenciando al conductor para que este fije una cierta velocidad deseada para el recorrido.

La orografía es una variable mucho más difícil de evaluar e introducir en los modelos de estimación de las velocidades de operación, por lo que su estudio también se realiza de una forma mucho más variable que los estudios para los anteriores condicionantes.

Al contrario que los anteriores condicionantes, este es invariable y conocido desde la fase de diseño, por lo que su existencia incide de dos formas en el comportamiento de los conductores en la vía:

- Una orografía más accidentada obliga al ingeniero a diseñar la vía con una forma más sinuosa, con lo que la curvatura media es mucho mayor, disminuyendo la velocidad de operación final de los conductores. De hecho, algunos modelos de estimación de las velocidades de operación (Cielecki y Wieckowski, 1.993) han intentado introducir un parámetro representativo de la orografía junto con otro parámetro representativo de la curvatura media, obteniendo como resultado una gran correlación y, por tanto, empleando un solo parámetro en la calibración final del modelo.
- El conductor identifica la orografía más accidentada con un mayor peligro en la vía, por lo que también disminuye su velocidad de operación.

Como conclusión de las dos afecciones anteriores, y sin entrar en valoraciones cuantitativas (puesto que no hay una metodología estandarizada para la medición de la orografía), una orografía más accidentada implica descensos sensibles en la velocidad de operación.

El entorno

El sentido de este condicionante es más extenso que el de orografía, y comprende todo aquello de lo que el conductor puede percibir en un punto en concreto y a medida que va recorriendo la vía.

Existen diversas teorías acerca del proceso perceptivo-cognitivo que el ser humano realiza sobre toda la información que es capaz de captar por medio de sus sentidos, desde el instante en que esta es captada hasta la información de la que realmente acaba siendo consciente.

De este modo, se puede afirmar que al conductor le llega una gran cantidad de información de la vía, la cual, tras un proceso mental inconsciente, acaba traduciéndose en una cantidad mucho menor de información, que es la que el conductor finalmente interpreta y a la cual reacciona de forma consciente. Puede resumirse este proceso en el hecho de que el conductor reacciona no a la realidad, sino a una interpretación inconsciente de la misma.

No todo el entorno influye con el mismo peso sobre el conductor. Puesto que este está centrado sobre la carretera, tendrá más influencia sobre el mismo todo lo que esté situado en las proximidades de la misma. Este es el motivo por el cual actuaciones sobre el tratamiento de los arcones o las bermas tienen influencia final sobre la conducción, aun siendo elementos situados exteriormente al recorrido del mismo.

Debido a la gran variabilidad de los condicionantes relacionados con el entorno y a la dificultad de su medición todavía no hay resultados relevantes sobre su influencia en la velocidad de operación.

El factor humano

Las variables relacionadas con los conductores individuales son las más difíciles de identificar y estimar, y las causantes de la variabilidad residual en los modelos de predicción de las velocidades de operación.

Estas variables son fundamentalmente variables asociadas a la psicología y a las condiciones particulares de cada conductor, como edad, sexo, experiencia en la conducción, el conocimiento de la vía, el propósito del viaje, etc.

La influencia de estos aspectos en la velocidad se describirá más en profundidad en el apartado correspondiente, en el que se describirán los estudios que con el objetivo de su estudio se han realizado.

El vehículo

El vehículo es el tercero de los factores concurrentes que más influyen en la siniestralidad y también en la elección de la velocidad.

El tipo de vehículo es la variable asociada que más suele influir en la velocidad, distinguiendo generalmente entre ligeros, medios y pesados. Sin embargo, esta variable no es la única a considerar sino que también son importantes la relación peso/potencia, el modelo o la antigüedad del vehículo. Por ejemplo, los conductores

con vehículos ligeros, deportivos y nuevos suelen circular a una mayor velocidad y asumir más riesgos.

En la consideración de la influencia de estas variables en la velocidad en un análisis individual hay que tener en cuenta que estas variables suelen estar afectadas por otras variables, especialmente variables como la edad del conductor.

La velocidad deseada

Se entiende como *velocidad deseada* la velocidad a la que los conductores desean circular por cierta vía, cuando no existen coacciones de ningún tipo (geométricas, de tráfico, meteorológicas u otras). Tal y como está definida la variable (de carácter totalmente operacional) no puede ser directamente medida, sino que debe ser estimada basándose en otras variables.

La medición más aceptada de la velocidad deseada es la velocidad de operación a la que circulan los vehículos en condiciones de flujo libre y en un tramo recto de vía de gran longitud, de forma que las alineaciones inicial y final no ejerzan un efecto de control sobre la velocidad. Las condiciones de luminosidad, pavimento, etc. deben ser las adecuadas.

La velocidad deseada es diferente para cada conductor, influenciando en la misma numerosas variables independientes de la vía y asociadas a otras causas, como el propósito del viaje, el conocimiento previo de la vía, la longitud total estimada del desplazamiento, etc. Como puede deducirse, no sólo es una variable cuya estimación depende tanto de la geometría media de la vía como de su clasificación funcional, sino que su variabilidad es muy grande.

Esta variable se emplea como input en muchas estimaciones de velocidades de operación en rectas, ya que en estas la vía no ejerce realmente un control sobre el vehículo, siendo las velocidades registradas mucho más variables que en curvas.

Hansen et al. (2007) analizaron la influencia de diferentes elementos geométricos y del entorno de la vía sobre la velocidad deseada.

Se analizaron dos tipos de variables: geométricas y del entorno. Las variables analizadas del primer tipo fueron la anchura del carril, anchura del arcén, ancho de calzada y tipo de arcén. En cuanto a las del segundo tipo, se analizó la presencia de aceras, distancia hasta la edificación, densidad de accesos y tipos de uso del terreno.

Las variables con mayor influencia fueron el ancho de arcén, la velocidad límite, la distancia hasta las edificaciones y el uso del terreno.

Por otra parte, Crisman et al. (2005) analizaron la velocidad deseada (denominada en este caso como "*environmental speed*") considerando que esta se da en rectas muy largas o curvas de gran desarrollo y muy grandes radios.

El modelo de estimación de la misma en este caso se hizo depender del ratio de cambio de curvatura (*CCR*), el ancho de la vía y el radio medio de una sección homogénea. Las secciones homogéneas se pueden obtener empleando el "método alemán", determinándose a partir de representar los ángulos de deflexión

acumulados en función de la longitud de vía recorrida y ajustando así diversas tendencias.

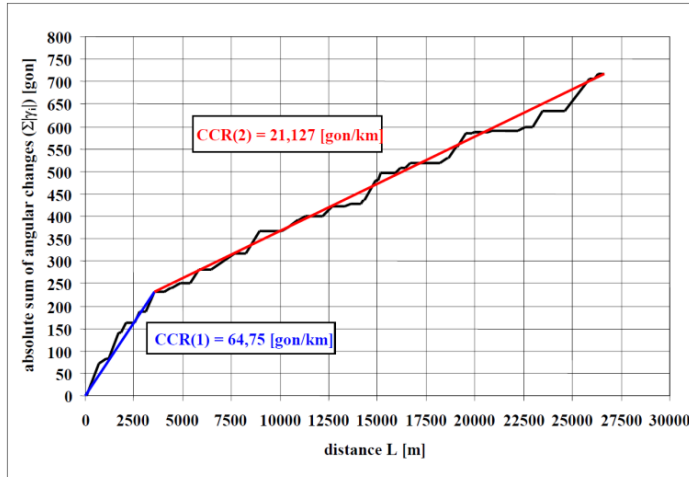


Figura 3.3 Ejemplo del método alemán para dividir una vía en tramos homogéneos

Se calibraron diversas relaciones, aunque las mejores fueron las que dependen del ancho de la calzada y del CCR. Las relaciones fueron las mostradas en la tabla 3.3.

Modelo	Relación	R ² (%)
1	$v_{des} = 200.97 \cdot CCR^{-0.1563}$	87
2	$v_{des} = 37.865 \cdot CCR_m^{0.1667}$	96
3	$v_{des} = 69.98 - 0.08 \cdot CCR + 5.30 \cdot L_p$	91
4	$v_{des} = 70.18 - 0.0176 \cdot R_m + 2.88 \cdot L_p$	83

Donde:

v_{des} : velocidad deseada (km/h)

CCR : ratio de cambio de curvatura (gon/km)

R_m : radio medio del tramo en estudio (m)

L_p : ancho de la calzada (m)

Tabla 3.3 Relaciones calibradas por el estudio de Crisman et al. (2005)

3.3.2.2. Factores internos de la vía

Dentro de este apartado se describen las diferentes variables que pueden presentar cierta influencia sobre la velocidad de operación y que están íntimamente relacionadas con la carretera, abarcando desde las características geométricas de los diferentes elementos del trazado hasta densidad de señalización o de accesos.

Clase funcional de la vía

La clasificación funcional de la vía es la base para el diseño de un tramo de carretera. Esta clasificación atiende al objetivo final de la vía, clasificándola según el tipo de tráfico que va a atender. Así, por ejemplo, se distingue entre vías diseñadas para soportar tráfico de desplazamientos medios o largos y vías de acceso a zonas residenciales. De este modo, la geometría, sección transversal y equipamientos serán consecuencia de la misma.

La clasificación funcional de la vía no sólo influye en los parámetros anteriores, sino que también tiene cierta influencia psicológica sobre los conductores. El hecho de que el desplazamiento de un vehículo sea de larga distancia implica que con mayor probabilidad la vía empleada para dicho desplazamiento será de alta capacidad. Lo mismo ocurre en el caso contrario, con desplazamientos menores.

Como consecuencia, las velocidades de operación mayores se dan en vías de mayor capacidad.

Densidad de señalización

No es una variable típicamente estudiada para los modelos de velocidad de operación, pero diversos estudios realizados muestran cómo a mayores densidades de señalización la velocidad de operación es menor. Esto puede ser explicado porque la existencia de más señales requiere más atención a estas por parte de los conductores.

Densidad de accesos

La variable densidad de accesos controla el número de accesos a la vía (incorporaciones e intersecciones) en estudio por unidad de longitud. Diversos estudios han empleado esta variable en los modelos de estimación de velocidades de operación en rectas.

En los casos en los que el tramo de estudio sea de corta longitud, por muy pocos accesos que haya, la densidad de accesos resultará muy alta. Es por ello que para este tipo de tramos se prefiere emplear el número de accesos.

Según el estudio de Fitzpatrick (2000), una mayor densidad de accesos conduce a una velocidad de operación menor.

Sección transversal

Se ha estudiado ampliamente la influencia sobre la velocidad de operación de la anchura de carriles y arcones. Las tres variables han resultado significativas sobre la misma, llegando a incluirse en algunos modelos para su estimación.

La anchura de carriles es la variable más empleada en los modelos discretos. Una mayor anchura provoca que los conductores se sientan más seguros en su conducción, ya que se les permite un mayor margen de maniobra, con lo que las velocidades de operación aumentan.

Evidentemente, el razonamiento anterior es cierto dentro de un estrecho rango de límites. De este modo, estrechar el ancho de los carriles sí tiene un efecto de

reducción de la velocidad de operación (al igual que un ensanchamiento provoca un aumento), pero ensanchar los carriles a partir de cierto límite no supone un mayor aumento de la velocidad de operación, sino que esta permanece constante.

También es importante el modo en el cual se delimitan los carriles y los arcenes. Así, la existencia de las marcas viales que delimiten los carriles provoca un aumento de la velocidad de operación, comparando con el caso en que no existan dichas líneas.

La influencia de los arcenes no es tan grande como la de los carriles, aunque su comportamiento es similar. Un aumento en la anchura de los arcenes induce una mayor velocidad de operación (hasta cierto límite), mientras que un estrechamiento de los mismos provoca un descenso de la velocidad.

Sobre los arcenes influye también una nueva variable que no existe sobre los carriles, y es el modo en que estos han sido tratados. Los arcenes pavimentados inducen una mayor velocidad que los arcenes sin pavimentar.

Visibilidad frontal

La visibilidad frontal juega un papel fundamental sobre la velocidad de operación. Tramos con gran distancia de visibilidad presentarán mayores velocidades de operación que tramos similares con menor visibilidad, donde los conductores tienden a reducir la velocidad con el fin de disminuir también la distancia de frenado frente a cualquier obstáculo presente en la carretera.

Visibilidad lateral

La visibilidad lateral juega un papel menos importante sobre la velocidad de operación, y además ha sido menos estudiada que la visibilidad frontal. Sin embargo, en los estudios realizados se ha llegado a la conclusión de que sí afecta a la velocidad de operación.

La falta de estudios acerca de esta variable es debida no sólo a la creencia de que es menos influyente sobre la velocidad de operación que otras variables, sino también a que es más difícil de introducir como parámetro en los modelos o de definir un parámetro para ser estudiado. Mientras que hay consenso en que la visibilidad frontal debe medirse como distancia de visibilidad, no ocurre lo mismo con la visibilidad lateral.

Para medir la visibilidad lateral suelen emplearse criterios cualitativos, tales como la escala de Zegeer, que valora de 1 a 7 la visibilidad del entorno (1: visibilidad lateral total, 7: visibilidad lateral muy impedida).

Una menor visibilidad lateral implica una menor velocidad de operación, de acuerdo con los estudios realizados, aunque su efecto es mucho más ligero que el de la visibilidad frontal.

Características geométricas de las curvas

Las curvas horizontales son los elementos geométricos del trazado que mayor control suponen sobre la velocidad de operación, influyendo no sólo en las propias secciones curvas sino también, en muchos casos, en las secciones rectas adyacentes.

Las características geométricas de las curvas en planta que mayor influencia tienen sobre la velocidad de operación son:

- Radio (R): es la variable más influyente sobre la velocidad de operación. Cuando el radio aumenta, la velocidad de operación en la curva tiende a aumentar y lo mismo ocurre en la sección recta siguiente.
- Grado de curvatura (DC): esta variable guarda relación directa con el radio, definiéndose bien como el ángulo abarcado por un arco de 100 pies o como el ángulo abarcado por un arco de 100 metros de longitud.
- Ángulo de deflexión (Δ): El ángulo de deflexión mide el grado de abertura de una transición curva (formada únicamente por una curva o por combinación de curvas y clotoides).
- Longitud de la curva (L_c): generalmente los estudios utilizan únicamente la longitud de la curva, sin embargo cabría también diferenciar entre longitud total de la curva, longitud de la curva circular y longitud de las curvas de transición.
- Pendiente longitudinal de la curva (i_c): se trata de una variable poco estudiada debido principalmente a que la mayor parte de los estudios se basan únicamente en las características del trazado en planta.

En la figura 3.4 se muestra un esquema de las principales características geométricas de la curva en planta.



Figura 3.4 Características geométricas de la curva horizontal

Estas son las variables relacionadas con la curva en planta que más frecuentemente suelen utilizarse en el estudio de la velocidad de operación. Sin embargo, la presencia o no de curvas de transición también puede influir en la velocidad desarrollada tanto en rectas como en curvas.

Se han realizado diversas investigaciones encaminadas a determinar si la existencia de curvas de transición entre alineaciones altera el modo en que se cambia de velocidad. Los resultados son muy variados, siendo la conclusión más compartida la que indica que la existencia de una curva de transición no altera significativamente las velocidades, aunque sí ayuda más a los conductores y concreta más el tramo donde se cambia de velocidad.

Así, algunos estudios como los realizados por Passeti y Fambro (1999) indican que la existencia de curvas de transición no produce ningún efecto sobre las velocidades de operación.

Sin embargo, según Fitzpatrick (2000), la velocidad de operación en las curvas sin curvas de transición es ligeramente menor que las velocidades en las curvas con curvas de transición, lo cual da a entender que gracias a las curvas de transición el conductor consigue ajustar mejor su trayectoria, reduciendo menos su velocidad. Este efecto es mayor cuanto menor sea su radio.

Características geométricas de las rectas

Los parámetros locales de las rectas están mucho menos estudiados que en las curvas. En el caso de rectas, como parámetros geométricos únicamente podría enunciarse su longitud (L_T) y su pendiente (i_T).

Según la longitud de la recta, esta puede clasificarse como dependiente o independiente de los elementos de control externos en el estudio de las velocidades de operación.

Características geométricas de los acuerdos verticales

Existen dos tipos de acuerdos: cóncavos y convexos. La práctica totalidad de los estudios y modelos desarrollados hacen referencia a los acuerdos convexos, ya que en ellos los conductores pueden decelerar en caso de que haya poca visibilidad en el acuerdo.

Es por ello que se diferencia principalmente en dos tipos de acuerdos convexos: de visibilidad limitada y con visibilidad no limitada. Los del primer caso desarrollarán menores velocidades que los del segundo, donde el comportamiento de los conductores tenderá a acercarse, si la pendiente no es excesiva, al del terreno llano.

Además del tipo de acuerdo considerado, otras variables relacionadas con los acuerdos que pueden tener influencia en la velocidad de operación en rectas o curvas son el parámetro del acuerdo, su longitud y la pendiente de entrada.

Fitzpatrick et al. (2000) estudiaron la relación entre el parámetro del acuerdo en acuerdos convexos y la velocidad de operación. Esta variable fue, junto con la longitud del acuerdo, la variable que más correlación presentó de todas las estudiadas con la velocidad de operación.

También se estudió la velocidad de operación en acuerdos cóncavos, sin encontrar relación estadística con ninguna de las variables analizadas.

En cuanto a la pendiente de entrada, Jessen et al. (2001) llegaron a la conclusión de que tenía una gran influencia sobre la velocidad en el punto de visibilidad limitada.

Índices de trazado

Los índices de trazado son parámetros que intentan resumir en una única cifra o descriptor el comportamiento general de la vía o de un tramo de la misma.

De todos los índices de trazado que pueden definirse, los que resultan válidos para ser correlacionados con la velocidad de operación deben cumplir las siguientes condiciones:

- Ser función de la geometría de la vía.
- Presentar una relación con la velocidad de operación.

Los índices de trazado más conocidos se resumen a continuación:

- *CCR (Curvature Change Ratio)*. Se trata de un parámetro que indica el ángulo de deflexión total de la vía por unidad de longitud. Muy empleado en Alemania (cuyo método de diseño en función de la velocidad de operación se basa en este índice) y por Lamm para sus criterios de consistencia (sus modelos de velocidad de operación se basan en este índice). La expresión a emplear es la de la ecuación 1.

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

Donde:

Δ_i : ángulo de deflexión de cada elemento geométrico (°)

L : longitud del tramo analizado (km)

- *CL/RL*. Ratio entre la longitud de las curvas de un tramo y la longitud total de la sección (ambas en las mismas unidades).
- *AVG R* (radio medio, "Average Radius"), también representado como *AR*. Promedio del radio en un tramo. Es el cociente entre la suma de los radios de un tramo y el número de estos.
- *AVG T* (recta media, "Average Tangent"). Promedio de las longitudes de las rectas de un tramo y el número de rectas del mismo.
- *CRR*. Ratio entre un radio y el promedio de los radios del trazado.

3.4. LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN Y EL FACTOR HUMANO Y EL VEHÍCULO

En el estudio de la seguridad vial se consideran como los principales factores concurrentes el vehículo, la infraestructura y el conductor. Asimismo, la velocidad es considerada como uno de los principales factores involucrados en la siniestralidad. La velocidad influye tanto en el riesgo de ocurrencia de un accidente como en la gravedad del mismo (Elvik et al. 2004) y los daños producidos por la colisión son proporcionales al cuadrado de la velocidad del impacto (Aarts y Van Shagen 2006).

Por ello, el estudio de la relación entre la velocidad desarrollada y estos tres factores proporciona una aproximación al comportamiento de los conductores.

Generalmente, los estudios relacionados se basan en la infraestructura, ya que este factor constituye el principal ámbito de actuación de los ingenieros. Sin embargo,

como describe Rocci (2010), los factores que más influyen en la elección de la velocidad de operación por parte del conductor son:

- Vehículo. Además de su tipo y antigüedad, los principales factores que influyen en la velocidad de operación de un vehículo están relacionados con:
 - Sus prestaciones, que influyen en su capacidad de aceleración, sobre todo en una rampa. Dependen de la relación entre la masa del vehículo y de la potencia de su motor.
 - La interacción entre los neumáticos y el pavimento que, al movilizar un rozamiento entre ambos, permite cambiar de trayectoria o de velocidad.
 - En algunos casos, la razón entre la anchura de apoyo del vehículo y la altura de su centro de gravedad sobre el pavimento, que influyen en la posibilidad de un vuelco.
- Características de los conductores. Constituyen un grupo bastante abstracto los factores que hacen referencia a las características de los conductores (personalidad, actitud, motivos, etc) y a sus circunstancias (edad, sexo, presencia de acompañantes, historial previo de accidentes e infracciones, actitud hacia las normas de tráfico y, en particular, hacia el límite de velocidad, finalidad del desplazamiento, placer derivado de la conducción, valoración del riesgo, valor asignado al tiempo ahorrado, costes asociados al desplazamiento, etc). Aunque han sido muy estudiados, los resultados han sido poco claros: son subjetivos o no son cuantificables. Unos factores se han mostrado significativos en algunos estudios, pero no en otros. Por ello, no resulta, en general, fácil tenerlos en cuenta, debido a la gran variabilidad de las circunstancias, y menos aún formular teorías generales sobre el comportamiento al volante. Esto subraya la complejidad de las decisiones de los conductores. Sin embargo, estos se mantienen dentro de unos márgenes de comportamiento que hacen que una estimación basada en factores medibles resulte suficientemente aproximada tanto para diseñar la vía, como para estimar perfiles de velocidad de operación.

El estudio de estos dos factores concurrentes puede resultar determinante a la hora de diseñar programas de seguridad vial, campañas de concienciación y programas de educación. Los resultados de estos análisis pueden suponer una mejora sustancial en las políticas de educación en seguridad vial al permitir focalizarlas en los aspectos que en mayor medida influyen en el comportamiento de los conductores.

3.4.1. La evaluación del riesgo asumido y los estilos de conducción mediante cuestionarios y autoinformes

Según Montoro et al. (2010), para lograr entender el comportamiento del conductor y aplicar políticas con efectos sostenidos en el tiempo es necesario conocer los

aspectos motivacionales y los procesos cognitivos del mismo. La percepción de la peligrosidad y la motivación para exceder la velocidad permiten predecir en parte el grado de respeto de la normativa. Por ello, las estrategias de intervención deben tener en cuenta estos factores, sobre todo los motivos concretos que aparecen especialmente relacionados con el grado de incumplimiento.

Un conjunto de estudios han analizado la relación entre la velocidad y la tasa de accidentes, llegando a la conclusión de que los vehículos que circulan más rápido presentan una mayor tasa de accidentes que los vehículos que se desplazan más lentos. Por otro lado, algunos estudios iniciales encontraron evidencia a favor de que los vehículos que circulan más lentos que los de su entorno también tendrían una mayor implicación en los accidentes.

Como comentaron Aarts y van Schagen (2006) en su revisión de los distintos trabajos relacionados con la velocidad y el riesgo de accidentes, uno de los enfoques más utilizados en la mayoría de las investigaciones sobre el comportamiento de los conductores consiste en la utilización de autoinformes sobre, por ejemplo, el comportamiento de circular a altas velocidades, y sobre las actitudes de los conductores.

Un ejemplo de estudio mediante autoinformes es el llevado a cabo por Fildes et al. (1991). Este estudio se realizó en dos vías urbanas y en dos vías interurbanas. En él tomaron datos de velocidad y seleccionaron aquellos conductores que conducían a una velocidad inferior al percentil 15 (lentos) y superior al 85 (rápidos) de la distribución de velocidad del tramo. Los conductores seleccionados fueron parados y se les preguntó sobre el número de vehículos en los que se habían visto involucrados durante los últimos 5 años. Los conductores rápidos habían tenido más accidentes que los más lentos. Sin embargo, este estudio se llevó a cabo en un número muy reducido de tramos y no se puede asegurar que la velocidad medida se correspondiera con la velocidad a la que circulaban en el momento de los accidentes.

Otros estudios realizados con una metodología similar pero abarcando más percentiles constatan que los vehículos que circulan a una velocidad mayor se han visto involucrados en más número de accidentes.

En 1997, Gavany et al., basándose en una muestra compuesta por conductores en edad universitaria, desarrollaron un inventario de ítems para identificar a partir de cuestionarios los distintos factores que los encuestados creen que influyen en la conducción a alta velocidad de otros conductores. El inventario resultante estaba formado por 5 grupos de factores: autogratificación; riesgo asumido; presiones de horario; desprecio a la tarea de conducción no considerándola una actividad productiva; y distracciones.

Los resultados indicaron que los factores que influyen en la elección de la velocidad consisten en los conocimientos adquiridos, las creencias, los valores, las actitudes y la confianza. Ellos dan motivos racionales a los conductores para conducir a más velocidad, por ejemplo llegar tarde u observar que el resto de los vehículos circulan rápido.

Los factores que permiten conducir a más velocidad son la posibilidad de hacerlo, la accesibilidad, las leyes y las habilidades para la conducción. Estos factores permiten a los conductores circular a más velocidad y pueden incluir el acceso a vehículos e infraestructuras que permiten una alta velocidad.

Los factores que refuerzan la elección de la velocidad vienen dados por otras personas, como la familia, los profesores, los líderes de la comunidad, legisladores, etc. El grado en el que la población da incentivos a los conductores que circulan a una alta velocidad contribuye a que se siga desarrollando. Sanciones mínimas o controles inadecuados forman parte también de estos factores.

Tarko y Figueroa (2006) mostraron cómo el riesgo percibido por un conductor en una sección de carretera está positivamente relacionado con el riesgo objetivo expresado como número de accidentes para una cierta distancia recorrida.

En el estudio tomaron datos demográficos de los encuestados (género, edad, tipo de trabajo y nivel de educación) y se les pidió que completaran un cuestionario sobre percepción del riesgo al finalizar una secuencia de videos que reflejaban la circulación por una carretera en flujo libre a diferentes velocidades. Posteriormente, completaron un cuestionario sobre información demográfica y sobre su estilo de conducción.

Los resultados mostraron que las mujeres perciben un riesgo mayor que los hombres. Los conductores inexpertos y los jóvenes perciben menos riesgo que los conductores experimentados y los adultos.

En 2007, Stradling llevó a cabo un estudio en el que destacaron que en las sociedades con un alto nivel de motorización, el comportamiento de los conductores frente a la velocidad varía sistemáticamente con ciertas variables demográficas, como el género del conductor y su edad. El comportamiento frente a la velocidad también dependen de las variables de oportunidad, como los kilómetros conducidos anualmente, la potencia y tamaño del vehículo; de las variables de obligación, como el objetivo del viaje y la presión del tiempo; y de las variables de inclinación, como los índices de personalidad del conductor.

En el estudio, recogieron las respuestas de las impresiones de los conductores ante ciertos escenarios mediante autoinformes. Se identificó una estructura de tres factores que influyen en la elección de la velocidad por parte de los conductores:

- Factor 1: incluye variables que tienen a las condiciones de tráfico adversas como punto en común. Dentro de este factor se encuentra el conducir por carreteras poco habituales, por donde se circula a menor velocidad.
- Factor 2: variables que hacen variar la velocidad por la sensación de deber u obligación. Dentro de este factor se encuentra el hecho de si como pasajeros van niños o ancianos. En este caso también se circula a menor velocidad.
- Factor 3: variables en las que es probable que aparezcan sensaciones de excitación, estimulación o agitación. Dentro de este grupo se encuentra el hecho de viajar con pasajeros de la misma edad del conductor. En este caso la velocidad aumenta.

Una mención especial merecen los conductores de edad avanzada. Schwebel et al. (2007) llevaron a cabo un estudio en el que una muestra de 101 conductores con una edad de 75 años o más completaron autoinformes con diferentes medidas de personalidad, temperamento e historial de conducción. Los participantes también completaron un entorno virtual diseñado para evaluar el comportamiento de los conductores.

Los cuestionarios utilizados fueron:

- la versión corta del *Driving Behavior Questionnaire*, que es un inventario de 24 ítems que abarca tres factores relacionados con el comportamiento de los conductores como son las sanciones, los errores y los fallos en la conducción.
- La versión corta del *Adult Temperament Questionnaire* que es una medida de 77 ítems dando como resultado 19 escalas de 4 factores: extroversión, afecciones negativas, autocontrol y orientación.
- la escala *Sensation-Seeking Scale – Form V*, que es una medida de 40 ítems.

Llegaron a la conclusión de que, entre personas ancianas, la personalidad y el temperamento tiene una gran influencia en el riesgo asumido y la velocidad elegida.

Finalmente, uno de los estudios más recientes relacionados con el vehículo fue llevado a cabo por Horswill y Coster (2010). Su estudio se basó en el análisis de los datos obtenidos de una serie de cuestionarios realizados a una muestra de conductores realizado en Reino Unido junto con datos procedentes de mediciones de velocidad. Los resultados revelaron una relación significativa entre las prestaciones del vehículo y el comportamiento de los conductores relacionado con el riesgo asumido. Los conductores con vehículos con mayores prestaciones y medidas de seguridad tienden a conducir a mayores velocidades. Además, los resultados indicaron que la relación entre las prestaciones de los vehículos y el riesgo asumido es bi-direccional: los conductores que conducen más rápido prefieren comprar vehículos de altas prestaciones y los vehículos con mayores prestaciones producen que los conductores conduzcan más rápido.

3.4.2. La velocidad como medida del riesgo asumido y los estilos de conducción

Es bien conocida la gran incidencia del factor humano en el desencadenamiento de los accidentes, ya que en la inmensa mayoría de los accidentes se registra en algún momento un fallo humano. De hecho, la responsabilidad del factor humano en la aparición de accidentes se cifra aproximadamente en el 90 % de los casos.

Ciertas características asociadas con una alta implicación en accidentes tienden también a estar asociadas a una conducción diaria arriesgada. Por tanto, el estudio de las diferencias en el comportamiento en la conducción diaria entre distintos tipos de usuarios puede ser una buena aproximación a sus diferencias en cuanto a la siniestralidad.

Un aspecto particular del comportamiento de los conductores, como la alta velocidad o el pequeño intervalo con el vehículo precedente, debe ser estudiado no porque tenga una importancia directa en la causa de los accidentes sino porque se asume que puede reflejar un patrón de comportamiento con influencia en la siniestralidad.

En esta hipótesis se basó el estudio realizado por Wasielewski (1984). Su estudio se ha basado en la observación de la velocidad de vehículos aislados y su relación con las características del conductor, del vehículo y del viaje. Las velocidades observadas en este estudio no representan el comportamiento de un conductor que inmediatamente vaya a formar parte de un accidente, sino más bien el comportamiento que puede asumirse como indicativo de las actitudes del conductor frente al riesgo.

Los datos fueron obtenidos de forma puntual en un tramo recto de una carretera convencional de Michigan (EEUU) mediante un medidor de velocidad radar para la obtención de velocidades de vehículos ligeros en flujo libre (más de 4 segundos de intervalo) y una cámara fotográfica para la obtención o estimación del resto de variables, como son los datos referentes al vehículo y al conductor.

Además del estudio individual de cada una de las variables, se realizó también un análisis multivariable con el fin de no confundir los efectos producidos con cada una de las variables, por la posible relación existente entre ellas. Por ejemplo, la velocidad observada en un estudio para mujeres puede ser mayor que la observada para los hombres, pero esto puede reflejar la circunstancia accidental de que las mujeres observadas tiendan a ser más jóvenes que los hombres. Por lo que, las velocidades más altas pueden atribuirse más a la edad que al género del conductor.

Los resultados de este estudio consisten en las relaciones existentes entre las variables independientes (las características del conductor, del vehículo y del viaje) y la velocidad como variable dependiente relacionada con el riesgo.

Tras el estudio se confirmó que los conductores jóvenes circulan a una velocidad mayor y, por tanto, asumen un riesgo mayor.

En cuanto al género del conductor, se concluyó que no hay un efecto significativo del género del conductor en la velocidad elegida, aunque, en general, en otros estudios se ha indicado que las velocidades más altas se han recogido para hombres. De esta conclusión puede extraerse que los resultados dependen de la zona en la que se toman los datos.

Otro factor que hace disminuir la velocidad es la presencia de pasajeros y otro que la hace aumentar es la recurrencia del viaje.

Se evaluó también la influencia del historial de accidentes y sanciones en la velocidad. Los resultados del análisis individual mostraron una conducción más arriesgada en los conductores con un historial mayor de accidentes o de sanciones, mientras que en el análisis multivariante el historial de accidentes no presentó significancia estadística, pero el historial de sanciones sí.

Finalmente, evaluaron también la influencia del tipo de vehículo. En el análisis individual, esta variable se encuentra afectada por otras variables, especialmente la edad del conductor. Por ello, fue necesario el análisis multivariable. En él, los resultados mostraron una velocidad menor para los vehículos ligeros y una velocidad similar para los otros dos tipos de vehículo (medio y pesado). Además, se comprobó que los conductores con vehículos más nuevos asumen más riesgos.

En 1993, Jorgensen y Polak presentaron un modelo económico simple del comportamiento de los conductores en relación a la elección de la velocidad, que tiene en cuenta la influencia de ciertos factores personales y relacionados con la actitud ante la conducción. Para ello, la toma de datos consistió en la medición de la velocidad de los vehículos que circulaban por un único tramo de carretera, a los que posteriormente se les paró y se les realizó una pequeña encuesta.

Para el análisis de los datos se basaron en la estimación de dos modelos de selección de velocidad mediante regresión OLS (Ordinary Least Squares). En el primer modelo la variable dependiente fue la velocidad deseada sin la influencia de los límites de velocidad mientras que el segundo la variable era la velocidad medida considerando los límites de velocidad.

Las variables evaluadas fueron la experiencia en la conducción calculada como el producto del número de años que el conductor tiene el carné de conducir por la media de los kilómetros recorridos en los últimos 3 años (EXP); la edad del conductor en años (AGE); el sexo del conductor como una variable dicotómica (hombre=1, mujer=0) (SEX); la importancia para el conductor del tiempo ahorrado en el viaje (TTS); la probabilidad percibida por el conductor de ser sancionado por exceso de velocidad en el tramo de estudio (PPC); la pérdida percibida por el conductor en caso de ser sancionado por exceder el límite de velocidad en 15 km/h (alto: PLC1=PLC2=1; moderado: PLC1=0 y PLC2 =1; bajo: PLC1=PLC2=0).

En la tabla 3.4 se muestran los resultados obtenidos. En ella, puede observarse como el coeficiente de EXP implica que la elasticidad de la velocidad elegida sin límites de velocidad con respecto a la experiencia en la conducción es 0.01, mientras que en el caso de considerar los límites de velocidad la elasticidad es 0.009. El coeficiente de AGE implica que la elasticidad de la velocidad elegida sin límites de velocidad con respecto a la edad del conductor es -0.115, mientras que en el segundo caso es -0.025. El coeficiente de SEX indica que, cuando el valor del resto de los factores es igual, los hombres seleccionarán una velocidad un 3.6 % mayor que las mujeres. Sin embargo, en el caso de la consideración de los límites de velocidad el sexo del conductor no resulta significativo.

Speed Selection Model Estimation Results

Variable	Coefficient (and t-statistic)	
	Without Speed Limit (Dependent variable = s^*)	With Speed Limit (Dependent variable = \hat{s})
EXP	0.010 (1.7)	0.009 (2.0)
AGE	-0.115 (-7.3)	-0.025 (-1.8)
SEX	0.036 (2.6)	-0.009 (-0.7)
TTS	0.052 (4.6)	0.035 (3.3)
PPC	—	0.0003 (0.3)
PLC1	—	-0.024 (-2.6)
PLC2	—	-0.024 (-1.2)
Diagnostics		
N	508	508
R ²	0.21	0.07
F	33.8	4.8

Tabla 3.4 Resultados de los modelos de Jorgensen y Polak (1993)

El bajo R² de ambos modelos indica que se han omitido variables explicativas clave. En el estudio se citan como posibles variables: factores relacionados con el vehículo (tamaño, tipo); factores relacionados con la seguridad (uso cinturón seguridad); factores relacionados con las características del viaje (número de pasajeros, necesidad de llegar a una hora determinada a destino); y factores relacionados con las características de los conductores, su conocimiento y percepción de los límites de velocidad y su actitud frente al riesgo.

Tomando como referencia el estudio de Wasielewski (1984), Williams et al. (2006) llevaron a cabo una investigación para determinar las características de los conductores más rápidos, denominados en el estudio como “speeders”, considerando estos como aquellos que circulan al menos a 15 mph sobre el límite de velocidad y 5 mph más rápido que los vehículos de alrededor. Estos conductores se compararon con los vehículos adyacentes que no circulaban a más de 5 mph sobre el límite de velocidad. Se compararon estos dos grupos porque si los vehículos más rápidos iban más rápidos quiere decir que los lentos podían haber alcanzado esa velocidad pero decidieron no hacerlo.

A partir de las matrículas se identificaron los conductores (si su género y edad aproximada coincidía con los observados en los videos). Para estos conductores se obtuvo la información exacta sobre edad y género, marca del vehículo y modelo, así como también datos sobre su conducción, como datos de multas por exceso de velocidad y accidentes. La muestra final estaba compuesta por 405 “speeders” y 287 conductores lentos.

Los resultados mostraron que los conductores más rápidos son más jóvenes, tienen más posibilidad de conducir vehículos más nuevos y deportivos y tienen menos probabilidad de conducir minivans. Los hombres tienen más probabilidad de

conducir más rápido que las mujeres. Además, los "speeders" tienen más multas por exceso de velocidad y se han visto involucrados en más accidentes.

A partir de esos estudios hay suficientes evidencias para asumir que los conductores que circulan a altas velocidades suponen un grupo de alto riesgo. De esta forma la velocidad se convierte en una medida del riesgo asumido por el conductor.

Pero, además, la velocidad y la aceleración pueden convertirse también en medidas para la identificación de los distintos estilos de conducción. Según Lajunen et al. (1997), la velocidad elegida por los conductores se muestra consistente a lo largo del tiempo y del espacio y, por tanto, puede ser considerada como una medida de los diferentes estilos de conducción, ya que además la elección de la velocidad es un acto voluntario del conductor.

A pesar de ello, hay ciertos problemas a la hora de utilizar la velocidad como medida del estilo de conducción ya que esta puede estar condicionada bien por los límites generales y específicos de velocidad o bien por las características del flujo de tráfico, por lo que el conductor no puede elegirla libremente. Por tanto, los efectos de los factores individuales, como la personalidad o la motivación, se encuentran limitados.

Sin embargo, las aceleraciones y deceleraciones no están condicionadas por ninguna regla o convención social. Por tanto, esta puede ser una mejor medida del comportamiento de los conductores. De hecho, incluso se considera que los valores pico de aceleración están más relacionados con el conductor y son más independientes del vehículo que las deceleraciones.

Lajunen et al. (1997) investigaron las diferentes medidas de la velocidad y de la aceleración como medidas del estilo de conducción a partir de 58 hombres jóvenes que condujeron un vehículo instrumentado a lo largo de 7.1 km. El estilo de conducción se midió a partir de dos medidas específicas, la velocidad en un acuerdo convexo y la velocidad y la aceleración lateral en una curva suave y en otra de radio reducido. Asimismo, se tuvieron en cuenta medidas generales como la velocidad máxima y las aceleraciones laterales y longitudinales a lo largo del trayecto.

Los datos sociológicos recogidos en una entrevista previa a los conductores fueron: fecha de nacimiento, fecha y tipo de permiso de conducir, kilometraje total y kilometraje medio al año, número y tipo de accidentes en los que el conductor ha estado implicado, y número y tipo de sanciones recibidas.

Los resultados del análisis de la varianza realizados mostraron que ni la implicación en accidentes, ni la experiencia en la conducción, ni su interacción son significativas en la velocidad desarrollada en el punto alto de un acuerdo convexo.

En las curvas, la experiencia en la conducción no fue significativa en la determinación de la máxima aceleración lateral. En las curvas de radio reducido, la implicación previa en accidentes sí estaba significativamente relacionada con la máxima aceleración a la derecha. Esta relación no resultó significativa para curvas de radios mayores.

En cuanto a la velocidad, el análisis de la varianza indicó que la implicación previa en accidentes estaba significativamente relacionada con la velocidad en curvas de

radio reducido, mientras que la experiencia en la conducción no mostró efecto alguno en la velocidad en esa zona. Ninguna de las dos variables tuvo relación significativa con la velocidad en las curvas de radio amplio.

Respecto a la máxima velocidad desarrollada a lo largo del trayecto, el análisis mostró que la implicación previa en accidentes estaba directamente relacionada con ella, mientras que la experiencia no mostró relación significativa. Por otra parte, el número de accidentes y la experiencia no mostraron relación significativa con la aceleración longitudinal y tampoco con la deceleración.

Este trabajo concluye con la afirmación de que la máxima velocidad registrada es una medida del estilo de conducción más robusta que la aceleración y las medidas derivadas de esta. Una alta velocidad objetivo se traduce en altas fuerzas laterales e incrementa el riesgo de accidente.

Sin embargo, Wahlberg en 2006 llevó a cabo un estudio en el que analizó la relación entre la velocidad y la deceleración con la presencia individual en accidentes de tráfico. En este estudio, se concluyó que el comportamiento de la deceleración da como resultado una mayor correlación media con los accidentes registrados comparando con las variables relacionadas con la velocidad, como la desviación típica, la media y el valor máximo. A pesar de ello, las diferencias fueron muy pequeñas y no significativas.

3.5. LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN Y LA GEOMETRÍA DE LA CARRETERA

La seguridad vial depende de una gran cantidad de factores, siendo la consistencia del diseño uno de los más importantes ya que se refiere al ajuste de la geometría de la vía con las expectativas de los conductores. La verificación de la consistencia del diseño tiene como objetivo evitar las configuraciones en el trazado de la carretera que puedan sorprender a los conductores y dar como consecuencia un comportamiento anómalo y posibles colisiones.

Una técnica para evaluar la consistencia de un diseño es evaluar los cambios en la velocidad de operación como función de la geometría de la carretera. Para ello, la velocidad de operación (V_{85}) se define como el percentil 85 de la distribución de velocidades desarrolladas por los conductores en condiciones de flujo libre en un tramo de carretera. Estas condiciones de flujo libre se refieren a la circulación de un vehículo en unas condiciones tal que no se encuentra influenciado o condicionado por el vehículo precedente. El intervalo de tiempo entre un vehículo y el siguiente que hace que el segundo de ellos circule en las mismas condiciones que lo haría sin la presencia del primero se denomina intervalo de flujo libre. El valor de intervalo de flujo libre más empleado en estudios de velocidad de operación y consistencia es 5 segundos.

Bajo estas premisas, la estimación de la V_{85} en función de los elementos geométricos de la carretera hace posible asociar cada localización del trazado a un

valor estimado de velocidad de operación con el que verificar la consistencia del mismo.

Para ello, se han desarrollado distintos modelos para predecir, especialmente, la velocidad de operación en secciones curvas, habiendo también modelos para la estimación de velocidades en rectas y de 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. Este hecho puede ser el resultado de las diferencias en el comportamiento de los conductores de una región a otra y subraya el hecho de que un único modelo no puede ser universalmente aceptado.

Existen diferentes modelos de estimación de las velocidades de operación. La principal clasificación puede ser en discretos o continuos.

Los modelos discretos son aplicables a una alineación en particular (una curva circular horizontal, 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 concatenadas. Para ello suele hacer 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.

Existen también modelos continuos de velocidad de operación que pueden configurar un perfil de velocidad sin partir de modelos discretos, como pueden ser los basados en algoritmos genéticos.

Aunque se ha enunciado la posibilidad de constituir un perfil de velocidad de operación sintético sin necesidad de recurrir a modelos discretos, sigue siendo un proceso más complicado. Además, es útil conocer el comportamiento de los modelos discretos, ya que conociendo el comportamiento de la velocidad en cada uno de los elementos será más sencillo influir sobre la misma. Hay que tener en cuenta también que el conductor que representa la velocidad de cierto percentil en un elemento del trazado no representará ese mismo percentil en el siguiente elemento. Ello implica que la distribución de velocidades para cada elemento del trazado es diferente, dependiendo además de diferentes variables.

En este apartado se presenta una visión general de los distintos modelos que pueden encontrarse en la literatura referentes a carreteras de dos carriles de circulación, considerando tanto el elemento geométrico cuya velocidad de operación se pretende estimar como el procedimiento para la obtención del modelo.

3.5.1. Modelización de la velocidad 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. Son, además, 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.

Las conclusiones anteriores implican que se conocen con mayor profundidad en las curvas horizontales que en otro tipo de elementos cuáles son las variables de las que depende, llegando finalmente a modelos muy sencillos que se ajustan adecuadamente a lo que realmente ocurre.

3.5.1.1. Variables condicionantes

De todas las variables que controlan las curvas horizontales, 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 horizontales todos los modelos suelen contar con la variable *radio* (o *grado de curvatura*) 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.

Radio (R)

El radio (medido generalmente en metros) es la variable más influyente sobre la velocidad de operación en curvas horizontales, tal y como puede intuirse y como ha sido demostrado por multitud de estudios, al ser la variable que más variabilidad explica.

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 (DC)

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 (Δ)

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 horizontales no es tan importante como en el caso del radio (o del grado de curvatura), 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 (L)

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. (2.002) 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 de que a medida que la longitud de la curva aumenta, la velocidad de operación aumenta, explicándose dicho efecto en el hecho de que los conductores, a medida de 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 (L)

Se trata de una variable poco estudiada por los modelos que se centran en el estudio de las velocidades de operación en curvas horizontales, 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 horizontales a un rango de pendiente longitudinal (habitualmente $\pm 4\%$), 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 horizontales), 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 %.

Tasa de cambio de curvatura (CCR_s)

En el apartado de índices de trazado se ha introducido esta variable como 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.

Velocidad de la recta precedente (v_T)

De todas las variables definidas hasta ahora, esta presenta diferencias sustanciales respecto al resto. Esta es la única 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 horizontales 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.

Esta variable, además, relaciona la velocidad de la curva con otra velocidad del trazado, con lo que se logra introducir algo de dependencia entre la velocidad en un tramo y en los tramos anteriores.

Como puede apreciarse, 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.

Pendiente de la recta precedente (i_T)

Esta es la segunda de las variables no locales que pueden afectar las velocidades de operación en curvas horizontales. Al igual que en el caso anterior, sí tiene influencia sobre la velocidad de operación, aunque la variabilidad explicada suele ser algo 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 velocidad 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.

El comportamiento de esta variable es que a mayor pendiente en la entrada de la curva, la velocidad de operación es menor.

Velocidad límite (v_p)

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

3.5.1.2. Modelos para la estimación de velocidad 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.

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

En la tabla 3.5 se presenta una relación de los modelos más relevantes para la estimación de la velocidad de operación en curvas horizontales en los que se ha considerado únicamente el radio (R) en metros o el grado de curvatura (DC) en $^\circ$ por 100 pies de arco.

Año	Autor (es)	Modelo	R ²
1954	Taragin	$v_{85} = 88.87 - \frac{2554.76}{R}$	0.86
1981	McLean	$v_{85} = 101.2 - \frac{2730}{R}$	0.87
1986	Glennon et al.	$v_{85} = 103.96 - \frac{4524.94}{R}$	0.84
1986	Lamm y Choueiri	$v_{85} = 94.39 - \frac{3189.94}{R}$	0.79
1988	Lamm et al.	$v_{85} = 94.398 - \frac{3188.656}{R}$	0.79
1990	Kanellaidis et al.	$v_{85} = 109.09 - \frac{3837.55}{R}$	0.64
1990	Kanellaidis et al.	$v_{85} = 129.88 - \frac{623.1}{\sqrt{R}}$	0.77

1993	Ottesen	$v_{85} = 103.64 - \frac{3400.73}{R}$	0.80
1994	Ottesen y Krammes	$v_{85} = 103.70 - \frac{3403}{R}$	0.80
1994	Morrall y Talarico	$v_{85} = e^{4.564 - 0.00586 \cdot DC}$	0.63
1994	Islam y Seneviratne	$v_{85} = 103.03 - \frac{4208.76}{R} - \frac{36597.92}{R^2}$	0.98
1995	Krammes et al.	$v_{85} = 103.66 - 1.95 \cdot DC$	0.80
1999	Lamm et al	$v_{85} = 95.594 - 1.597 \cdot DC$	0.78
1999	Pasetti y Fambro	$v_{85} = 103.90 - \frac{3020.50}{R}$	0.68
2000	Ottesen y Krammes (Modelo 1)	$v_{85} = 103.66 - 1.95 \cdot DC$	0.80

Tabla 3.5 Modelos para estimación de velocidad de operación en curvas con el radio o el grado de curvatura como variables independientes

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 o la anchura de los carriles, dando como resultado las familias de modelos que se muestran en la tabla 3.6.

Año	Autor (es)	Modelo	Condiciones	R ²
1987	Lamm y Choueiri	$v_{85} = 89.55 - \frac{2862.69}{R}$	LW=3.0 m	0.75
1987	Lamm y Choueiri	$v_{85} = 93.83 - \frac{2955.40}{R}$	LW=3.3 m	0.74
1987	Lamm y Choueiri	$v_{85} = 96.15 - \frac{2803.70}{R}$	LW=3.6 m	0.82
1994	Islam y Seneviratne	$v_{85} = 95.41 - 1.48 \cdot DC - 0.012 \cdot DC^2$	Comienzo	0.99
1994	Islam y Seneviratne	$v_{85} = 103.30 - 2.41 \cdot DC - 0.029 \cdot DC^2$	Punto medio	0.98
1994	Islam y Seneviratne	$v_{85} = 96.11 - 1.07 \cdot DC$	Final	0.98
1996	Fitzpatrick et al.	$v_{85} = 102.10 - \frac{3077.13}{R}$	$-9\% \leq G < -4\%$	0.58
1996	Fitzpatrick et al.	$v_{85} = 105.98 - \frac{3709.90}{R}$	$-4\% \leq G < 0\%$	0.76
1996	Fitzpatrick et al.	$v_{85} = 104.82 - \frac{3574.51}{R}$	$0\% \leq G < 4\%$	0.76
1996	Fitzpatrick et al.	$v_{85} = 96.61 - \frac{2752.19}{R}$	$4\% \leq G < 9\%$	0.53
1996	Fitzpatrick et al.	$v_{85} = 105.32 - \frac{3438.19}{R}$	Acuerdo cóncavo	0.92

1996	Fitzpatrick et al.	$v_{85} = 103.24 - \frac{3576.51}{R}$	Acuerdo convexo	0.74
2000	Fitzpatrick et al.	$v_{85} = 106.30 + \frac{3595.29}{R}$	$0\% \leq G < 4\%$ ó HC+ cóncavo	0.92
2000	Fitzpatrick et al.	$v_{85} = 96.46 - \frac{2744.49}{R}$	$4\% \leq G < 9\%$	0.56
2000	Fitzpatrick et al.	$v_{85} = 100.87 - \frac{2720.78}{R}$	$-9\% \leq G < 0\%$	0.59
2000	Fitzpatrick et al.	$v_{85} = 101.90 - \frac{3283.01}{R}$	Acuerdo convexo	0.78
2010	Castro et al.	$v_{85} = 35.43 - 0.219 \cdot R$	$-9\% \leq G < -4\%$	0.72
2010	Castro et al.	$v_{85} = 37.18 - 0.1 \cdot R + 0.04 \cdot R_{n-1}$	$4\% \leq G < 9\%$	0.55
2010	Castro et al.	$v_{85} = 102.70 - 730.39/R + 1498.90/L_C$	Acuerdo cóncavo	0.84
2010	Castro et al.	$v_{85} = 93.79 - 867.61/R + 935.62/L_C$	Acuerdo convexo	0.66

Donde:

R : radio (m)

DC : grado de curvatura ($^\circ$ por 100 pies de arco)

LW : ancho de carril

G : pendiente

L_C : longitud de la curva (m)

R_{n-1} : radio de la curva anterior (m)

Tabla 3.6 Modelos para estimación de velocidad de operación en curvas con el radio o el grado de curvatura como variables independientes, considerando otras variables

Estos constituyen los modelos más sencillos y más utilizados. Sin embargo, 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.

A continuación, se resume en forma de tabla los modelos más conocidos, ordenados cronológicamente, para la estimación de la velocidad en curvas a partir de varias variables (tabla 3.7).

Año	Autor (es)	Modelo	R^2
1981	McLean	$v_{85} = 53.80 + 0.464 \cdot v_F - \frac{3260}{R} + \frac{85000}{R^2}$	0.92
1982	Kerman et al.	$v_{85} = v_a - \frac{v_a^3}{398 \cdot R}$	0.91
1986	Setra	$v_{85} = (102/1 + 346/(57.300/CCR)^{-1.5})$	N/A
1987	Lamm y Choueiri	$v_{85} = 93.85 - 0.045 \cdot CCR$	0.78

1987	Lamm y Choueiri	$v_{85} = 55.84 - \frac{2809.32}{R} + 0.634 \cdot LW + 0.053 \cdot SW + 0.0004 \cdot IMD$	0.84
1987	Lamm y Choueiri	$v_{85} = 95.6 - 0.04866667 \cdot CCR$	0.82
1990	Kanellaidis et al.	$v_{85} = 32.20 + 0.839 \cdot v_d + \frac{2226.9}{R} - \frac{533.6}{\sqrt{R}}$	0.92
1993	Lamm	$v_{85} = \frac{10^6}{8270} + 7.20 \cdot CCR$	0.73
1993	Krammes et al.	$v_{85} = 102.44 - \frac{274.81}{R} + 0.012 \cdot L_C - 0.10 \cdot I$	0.82
1994	Ottesen y Krammes	$v_{85} = 103.04 - 0.0477 \cdot CCR$	0.80
1995	Krammes et al.	$v_{85} = 102.45 - 1.57 \cdot DC + 0.0037 \cdot L_C - 0.10 \cdot DF$	0.82
1995	Krammes et al.	$v_{85} = 41.62 - 1.29 \cdot DC + 0.0049 \cdot L_C - 0.12 \cdot DF + 0.95 \cdot v_T$	0.90
1995	Lamm et al.	$v_{85} = \frac{10^6}{10150.1} + 7676 \cdot CCR$	0.81
1995	Choueiri et al.	$v_{85} = 91.03 - 0.050 \cdot CCR$	0.81
1996	Voigt	$v_{85} = 99.61 - \frac{2951.37}{R} + 0.014 \cdot L_C - 0.13 \cdot DF + 71.82 \cdot e$	0.84
1997	McFadden y Elefteriadou	$v_{85} = 41.62 - 1.29 \cdot DC + 0.0049 \cdot L_C - 0.12 \cdot DF + 0.95 \cdot v_T$	0.90
1999	Lamm et al.	$v_{85} = e^{4.561 - 0.000585555 \cdot CCR}$	0.63
2000	Ottesen y Krammes (Modelo 2)	$v_{85} = 102.44 - 1.57 \cdot DC + 0.012 \cdot L_C - 0.01 \cdot DC \cdot L_C$	0.81
2000	McFadden y Elefteriadou	$85 \text{ MSR} = -14.90 + 0.144 \cdot v_T - \frac{954.55}{R} + 0.0153 \cdot L_T$	0.71
2000	McFadden y Elefteriadou	$85 \text{ MSR} = -0.812 + \frac{998.19}{R} + 0.017 \cdot L_T$	0.60
2005	Crisman et al.	$v_{85} = 48.447 - \frac{4995.01}{R} + \frac{163893.24}{R^2} + 0.5598 \cdot v_d$	0.88

Donde:

- R*: radio (m)
- L_c*: longitud de la curva (m)
- CCR*: tasa de cambio de curvatura (°/km)
- DC*: grado de curvatura (° por 100 pies de arco)
- DF*: ángulo de deflexión (°)
- e*: peralte (%)
- L_T*: longitud de la recta precedente (m)
- LW*: ancho de carril (m)
- SW*: ancho de arcén (m)
- IMD*: intensidad media diaria (veh/día)
- v_d*: velocidad deseada (km/h)
- v_T*: percentil 85 de la velocidad de la recta precedente (km/h)
- v_F*: percentil 85 de la velocidad en recta basada en la velocidad de diseño y en el terreno (km/h)

Tabla 3.7 Modelos para la estimación de la velocidad de operación en curvas dependientes de varias variables.

Al igual que en el caso de los modelos más sencillos en los que la velocidad de operación se estima únicamente en función del radio, al utilizar más variables explicativas algunos estudios han desarrollado familias de modelos, en función del ancho de carril y de la tipología del elemento anterior a la curva, como las que se muestran en la tabla 3.8.

Año	Autor	Modelo	Condiciones	R ²
1987	Lamm y Choueiri	$v_{85} = 88.72 - 0.084 \cdot CCR$	LW=3.0 m	0.84
1987	Lamm y Choueiri	$v_{85} = 92.69 - 0.080 \cdot CCR$	LW=3.3 m	0.73
1987	Lamm y Choueiri	$v_{85} = 95.77 - 0.076 \cdot CCR$	LW=3.6 m	0.83
2000	Andueza	$v_{85} = 98.25 - \frac{2795}{R} - \frac{894}{R_a} + 7.486 \cdot DC + 9.308 \cdot L_T$	Elemento anterior: curva horizontal	0.84
2000	Andueza	$v_{85} = 100.69 - \frac{3032}{R} + 27.819 \cdot L_T$	Elemento anterior: recta	0.85

Donde:

- R*: radio (m)
- R_a*: radio de la curva anterior (m)
- L_T*: longitud de la recta precedente (m)
- CCR*: tasa de cambio de curvatura (°/km)
- DC*: grado de curvatura (° por 100 pies de arco)
- LW*: ancho de carril (m)

Tabla 3.8 Modelos para la estimación de la velocidad de operación en curvas dependientes de varias variables por condicionantes

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). En este caso, 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 horizontal, con coeficientes de determinación muy elevados: 99 %, 98 % y 90 %.

Las expresiones finalmente calibradas fueron las siguientes:

1. Punto inicial: $v_{85} = 95.41 - 1.48 \cdot DC - 0.012 \cdot DC^2$
2. Punto intermedio: $v_{85} = 103.30 - 2.41 \cdot DC - 0.029 \cdot DC^2$
3. Punto final: $v_{85} = 96.11 - 1.07 \cdot DC$

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.

1. Punto inicial: $v_{85} = 90.354 + 0.034 \cdot L_c - 0.347 \cdot \Delta$. Con este modelo el R^2 alcanzado fue 0.53. Con el fin de intentar aumentarlo, se desarrolló un nuevo modelo en el que se incluyó también la velocidad de la recta precedente. El problema de incluir esta variable es que Castro et al. (2011) no llegaron a desarrollar un modelo para la estimación de la velocidad en rectas por lo que no podría aplicarse.
2. Punto intermedio: $v_{85} = 91.132 + 0.033 \cdot L_c - 0.029 \cdot \Delta$. Con este modelo el R^2 alcanzado fue 0.76. Con el fin de intentar aumentarlo, intentaron de nuevo desarrollar un nuevo modelo en el que se incluyó también la velocidad de la recta precedente. El problema es el mismo que se ha citado para la velocidad de operación en el punto inicial.
3. Punto final: $v_{85} = 91.581 + 0.042 \cdot L_c - 0.489 \cdot \Delta$ con un R^2 de 0.76.

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 horizontales con acuerdos verticales, calibrando cinco modelos de velocidad de operación para cinco puntos diferentes de la curva:

- Punto 1. Situado en la recta precedente, entre 60 y 80 metros antes del inicio de la curva de transición (donde el conductor debe anticipar el efecto de la alineación vertical).
- Punto 2. Situado en el contacto entre la curva de transición inicial y la curva circular, en la dirección del recorrido (SC).
- Punto 3. Situado en el punto medio de la curva circular (MC).
- Punto 4. Se encuentra en el encuentro de la curva circular con la curva de transición final, en el sentido del recorrido (CS).
- Punto 5. Situado en la recta de salida, a una distancia de entre 60 y 80 metros del punto de finalización de la curva de transición final (el conductor está todavía influenciado por la curva horizontal y el acuerdo).

De este modo y de forma más extensa que en el estudio de Islam y Seneviratne (1994), se consiguió desarrollar un perfil pseudo-continuo de la velocidad de operación en las curvas.

Se calibraron dos grupos de modelos para acuerdos cóncavos: un primer grupo teniendo en cuenta únicamente características locales, y un segundo grupo considerando también la velocidad de aproximación, es decir, la velocidad medida en el punto 1. Los coeficientes de determinación varían entre 0,79 y 0,98.

El procedimiento seguido para los acuerdos convexos fue similar al empleado para acuerdos cóncavos. En este caso el coeficiente de determinación varía entre 0,83 y 0,98. Igualmente en los modelos del segundo grupo la influencia de la velocidad de la recta precedente era significativa.

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, 85 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.

Los modelos finalmente obtenidos fueron las mostradas en las ecuaciones 2, 3 y 4.

$$v_{50} = 67.4 - 0.1126 \cdot \Delta + 0.02243 \cdot L + 0.276 \cdot v_p \quad (2)$$

$$v_{85} = 103.3 - 0.1253 \cdot \Delta + 0.0238 \cdot L - 1.039 \cdot g_1 \quad (3)$$

$$v_{95} = 113.9 - 0.122 \cdot \Delta + 0.0178 \cdot L - 0.00184 \cdot IMD \quad (4)$$

Donde:

v_i : Media de velocidad de percentil i (km/h)

Δ : ángulo de deflexión (deg)

L : longitud de la curva m

v_p : velocidad límite (km/h)

g_1 : pendiente de aproximación %

IMD : Intensidad Media Diaria

Por otra parte, Nie y Hassan (2007) analizaron el comportamiento de los conductores en las curvas horizontales 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 (tabla 3.9).

Nº	Modelo	R ²
Todas las curvas		
1	$v_{85 AT} = 81.782 + 0.086 \cdot L_{AT}$	0.661
2	$v_{85 BC} = 108.132 - 0.090 \cdot CCR$	0.714
3	$v_{85 MC} = 108.357 - 0.097 \cdot CCR$	0.860
4	$v_{85 EC} = 102.238 - 0.092 \cdot CCR + 0.039 \cdot L_{DT}$	0.938
5	$v_{85 DT} = 78.690 - 0.00001127 \cdot R^2 + 0.066 \cdot L_{DT}$	0.857
6	$85MSR = 17.857 - 0.080 \cdot L_{DT} + 7.324 \cdot DFC$	0.729
7	$85MSI = -0.410 - 0.078 \cdot L_{DT}$	0.715
Curvas con recta de aproximación independiente		
8	$v_{85 BC} = 30.563 - 10.582 \cdot \ln R$	0.776
9	$v_{85 MC} = 110.386 - \frac{6856.213}{R}$	0.908

10	$v_{85EC} = 111.404 - \frac{7360.698}{R}$	0.868
11	$v_{85DT} = 76.486 - 0.127 \cdot L_{DT}$	0.767
12	$\Delta v_{85} = -5.326 - 0.073 \cdot CCR$	0.574
13	$\Delta_{85} v = -4.540 + 0.088 \cdot CCR$	0.749
14	$85MSR = -0.658 + 0.107 \cdot CCR$	0.760

Donde:

v_{85} : velocidad de operación en la recta de aproximación, 100 metros antes del comienzo de la curva horizontal (incluidas las de transición), o, si no existe suficiente longitud, en el comienzo de dicha recta.

v_{85DT} : velocidad de operación en la recta de salida, 100 m después de la finalización de la curva horizontal (curvas de transición incluidas), o, si es de insuficiente longitud, en el punto final de dicha recta.

v_{85AT} : velocidad de operación en el comienzo de la curva circular.

v_{85MC} : velocidad de operación en el punto medio de la curva circular.

v_{85BC} : velocidad de operación en el punto final de la curva circular.

Δv_{85} : diferencial de velocidad de operación entre v_{85AT} y v_{85MC} .

$\Delta_{85} v$: diferencial calculado como el percentil 85 de las diferencias individuales entre los puntos AT y MC para cada conductor.

$85MSI$: diferencial de percentil 85 de las máximas reducciones de velocidad, tomada cada reducción como la diferencia entre la máxima velocidad en la recta y la mínima en la curva.

$85MSR$: diferencial de percentil 85 de los máximos incrementos de velocidad, tomados como la diferencia entre la mínima velocidad en la curva horizontal y la máxima en la recta de partida.

R : radio de la curva circular (m).

Δ : ángulo de deflexión (rad).

CCR : tasa de cambio de curvatura (gon/km).

L_{AT} , L_{DT} : longitudes de las rectas de llegada y salida (m).

Tabla 3.9 Ecuaciones obtenidas por Nie y Hassan (2007)

Finalmente, cabe destacar el modelo desarrollado por Bonneson y Pratt (2009) ya que no sólo considera vehículos ligeros, sino también vehículos pesados. Este modelo está basado en la hipótesis de que el conductor varía su demanda de rozamiento transversal en un intento por mantener su seguridad y la eficiencia del viaje.

Usualmente, el intervalo utilizado para diferenciar entre vehículos en flujo libre y condicionados es 5 segundos. Sin embargo, el intervalo considerado en este modelo fue de 7 segundos para vehículos ligeros y 3 segundos para pesados.

Se presentaron dos modelos (Ec. 5 y 6), uno para la estimación de la velocidad en curva correspondiente al percentil 85 ($R^2 = 0.97$) y otro para la estimación de la velocidad media en la curva ($R^2 = 0.98$), basados en 82 observaciones (41 para vehículos ligeros y 41 para vehículos pesados).

$$V_{c,85} = \left(\frac{15.0 \cdot R_p \cdot (0.196 - 0.00106 \cdot V_{t,85} + 0.000073 \cdot V_{t,85}^2 - 0.0150 \cdot I_{tk} + e/100)}{1 + 0.00109 \cdot R_p} \right)^{0.5} \leq V_{t,85} \quad (5)$$

$$V_{c,a} = \left(\frac{15.0 \cdot R_p \cdot (0.112 - 0.0006 \cdot V_{t,a} + 0.000091 \cdot V_{t,a}^2 - 0.0108 \cdot I_{tk} + e/100)}{1 + 0.00136 \cdot R_p} \right)^{0.5} \leq V_{t,a} \quad (6)$$

Donde:

$V_{c,85}$: percentil 85 de la velocidad en curva (mph)

$V_{t,85}$: percentil 85 de la velocidad en rectas (mph)

$V_{c,a}$: velocidad media en curvas (mph)

$V_{t,a}$: velocidad media en rectas (mph)

R_p : radio de la trayectoria (pies)

I_{tk} : indicador variable para vehículos pesados (=1 si el modelo se utiliza para vehículos pesados y =0 si no)

e : peralte (%)

En España, Castro et al. (2008), 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. El modelo se corresponde con la ecuación 7.

$$v_{85} = 120.16 - \frac{5596.72}{R} \quad (7)$$

3.5.2. Modelización de la velocidad 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. Esto 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, debido a la falta de variables geométricas concretas en las que centrarse. Esta falta de variables no sólo 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.

En el estudio de las velocidades de operación en rectas se pueden distinguir dos tipos de rectas:

- Rectas independientes: son rectas con una longitud suficiente para que los conductores puedan alcanzar su velocidad deseada, es decir, en estas rectas los factores que afectan a la elección de la velocidad no son específicamente geométricos, sino que pueden ser variables como la sección transversal, el entorno de la vía y el tráfico. La dispersión en estos casos es máxima y los modelos obtenidos por diversas investigaciones son mucho menos concluyentes y con unos coeficientes de determinación menos precisos.
- Rectas no independientes: son de menor longitud, de tal forma que los conductores no llegan a desarrollar su velocidad deseada por estar coartados por el carácter geométrico general de la vía o, al menos, por las alineaciones anterior y/o siguiente. En estos casos la dispersión de las velocidades es menor, existiendo algunos modelos de estimación de la velocidad que consideran algunas variables geométricas, como la longitud o los radios de las curvas adyacentes.

3.5.2.1. Variables condicionantes

Debido a la falta de variables geométricas para la modelización de la velocidad de operación en rectas, es necesario recurrir a variables no geométricas de la vía, tales como la anchura de carriles o arcones, o incluso a variables no directamente medibles, como la velocidad deseada.

Longitud (L_T)

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).

Pendiente longitudinal (i_T)

Segunda de las variables geométricas, con mayor relación con la velocidad de operación en rectas. La pendiente ejerce su influencia principalmente sobre los vehículos pesados, siendo la afección sobre estos diferente según la relación peso/potencia del mismo.

Teóricamente la influencia de esta variable debería ser que a mayor pendiente, la velocidad de operación disminuye, mientras que a menor pendiente aumenta.

El efecto de la disminución de velocidad a medida que aumenta la pendiente se puede observar igualmente en vehículos ligeros, aunque en este caso no existen tantos estudios.

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 de 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, 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 (L_{Tc})

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. 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 no proporciona métodos para el cálculo de la longitud crítica en otras condiciones.

Según el *Green Book*, 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.

Anchura de carril y de arcén (LW , SW)

Como ya se ha citado anteriormente, en general, 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 estudió 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.

Al contrario que en el caso de curvas circulares, en el cual se han tratado por separado cada una de las variables, en este caso se ha decidido tratarlas todas de

forma conjunta, puesto que su estudio no está tan estandarizado como en el otro caso, aplicando diferentes variables en los diferentes estudios.

La influencia de las variables de las alineaciones adyacentes será mayor cuanto menor sea la longitud de la recta. En el caso de que la recta sea independiente, pero de poca longitud, es de esperar que la velocidad mantenida por la misma sea menor que en el caso en que la recta sea de mucha mayor longitud.

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*, con diferente definición para rectas independientes o dependientes, separadas estas también por un umbral calibrable.

En este caso, para longitudes pequeñas, la medida geométrica depende exclusivamente de los radios de las curvas anterior y posterior. Pasado cierto umbral (el considerado frontera entre dependiente e independiente), la relación cambia para considerar también la longitud de la recta.

Otras variables

Anteriormente se han descrito las variables más empleadas para determinar la velocidad de operación en rectas.

Sin embargo, 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 ya han sido expuestas, como son la visibilidad lateral, la densidad de accesos o la región geográfica. La mayoría de ellas tiene influencia sobre todo el trazado, y no exclusivamente en las rectas. Es por ello que su tratamiento dependerá de cada modelo o estudio.

3.5.2.2. Modelos para la estimación de velocidad de operación en rectas

Los modelos de velocidad para rectas presentan mucha menor correlación que los modelos de curvas, debido a la falta de variables geométricas concretas en las que centrarse.

La falta de variables no sólo 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.

Para la estimación de la velocidad de operación en rectas, especialmente en las independientes, 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, 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.

Los modelos estáticos más conocidos son:

- Modelo de Ottesen y Krammes (2000). $v_T = 97.9 \text{ km/h}$.
- Modelo de Fitzpatrick y Collins (2000): $v_T = 100 \text{ km/h}$.
- Modelo de Easa (2003): $v_T \in (94,104) \text{ km/h}$, estimándose aproximadamente en 100 km/h en vías convencionales con velocidad límite de 90 km/h.

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 independientes 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 lógicas 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, mientras que aumenta al aumentar la longitud de la recta. 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 caso de tener un caso de total generalidad, se recomienda emplear la velocidad media (97.9 km/h).

Ese mismo año, Polus et al. 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*. Este parámetro se define de diferente forma dependiendo de si la longitud de la recta supera cierto umbral t (ver ec. 8).

$$GM_S = \frac{R_1 + R_2}{2}; L_T < t$$

$$GM_L = \frac{\left[L_T \cdot (R_1 \cdot R_2)^{\frac{1}{2}} \right]}{100}; L_T \geq t \quad (8)$$

Donde:

R_1 : radio de la curva anterior
 R_2 : radio de la curva posterior
 L_T : longitud de la recta

Se estudiaron varios modelos que relacionaban la velocidad de operación con las variables anteriores. Los modelos que más correlación presentaron fueron los correspondientes a las ecuaciones 9, 10 y 11.

$$v_{85} = v_{max} - \frac{a}{e^{b \cdot GM_i}} \quad (9)$$

$$v_{85} = c \cdot \ln(L_T) + d \quad (10)$$

$$v_{85} = m - \frac{m}{GM_i} \quad (11)$$

Donde:

v_{85} : velocidad de operación (km/h)
 v_{max} : velocidad máxima (km/h)
 GM_i : *geometric measure* ($i=S$ para rectas cortas e $i=L$ para rectas largas)
 L_T : longitud de la recta (m)
 a, b, c, d, m : coeficientes de ajuste

Se calibraron dos modelos dependientes de la variable GM , en función del valor de la misma. Los dos modelos son los mostrados en las ecuaciones 12 y 13.

$$v_{85} = 102.5 - \frac{37.34}{e^{0.00888 \cdot GM_L}}; GM_L \leq 200; R^2 = 0.332 \quad (12)$$

$$v_{85} = 105.00 - \frac{21.30}{e^{0.00092 \cdot GM_L}}; GM_L \leq 1000; R^2 = 0.228 \quad (13)$$

Como puede observarse, ambos presentan una correlación 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.

$$v_{85} = 101.11 - \frac{3420}{GM_S}; R^2 = 0.553 \quad (14)$$

- 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.

$$v_{85} = 98.405 - \frac{3184}{GM_L}; R^2 = 0.684 \quad (15)$$

$$v_{85} = 105.00 - \frac{28.107}{e^{0.00108 \cdot GM_L}}; R^2 = 0.742 \quad (16)$$

- 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 GML 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. El modelo mejor calibrado el mostrado en la ecuación 17.

$$v_{85} = 97.73 - 0.00067 \cdot GM; R^2 = 0.2 \quad (17)$$

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

$$v_{85} = 105.00 - \frac{22.953}{e^{0.00012 \cdot GM_L}}; R^2 = 0.838 \quad (18)$$

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 otros percentiles (ec. 19, 20 y 21).

$$v_{50} = 51.7 + 0.508 \cdot v_p \quad (19)$$

$$v_{85} = 70.2 + 0.434 \cdot v_p - 0.001307 \cdot IMD \quad (20)$$

$$v_{95} = 84.4 + 0.352 \cdot v_p - 0.001399 \cdot IMD \quad (21)$$

Donde:

v_i : velocidad de percentil i (km/h)

v_p : velocidad límite (km/h)

IMD : Intensidad Media Diaria

Otro modelo que utilizó velocidades como variables independientes velocidades 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, dando como resultado la ecuación 22.

$$v_{85} = -2.351 + 18.104 \cdot \log_{10} L + 0.585 \cdot v_{85c} \quad (22)$$

Donde:

v_{85} : velocidad de operación de la recta (km/h)

L: longitud de la recta (m)

v_{85c} : velocidad de operación de la curva precedente (km/h)

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.

3.5.3. Modelización de las variaciones de velocidad en las transiciones recta-curva

Como parámetro para la estimación de la seguridad, es importante conocer, la reducción de velocidad que se da entre una alineación y la siguiente (en los casos en que la velocidad de la segunda alineación sea menor). De hecho, es más influyente sobre la siniestralidad la reducción de velocidad que se da a la salida de una recta y en la entrada de la siguiente curva que las velocidades independientes a las que se circule por cada una de ambas alineaciones.

La variación de la velocidad de operación entre dos alineaciones puede definirse, al igual que la velocidad de operación, mediante un percentil.

Podría parecer, en un primer instante, que el percentil 85 de la reducción entre una alineación y la siguiente, de menor velocidad, es la resta de sus velocidades de operación, expresadas como percentiles 85. Si ello fuera cierto, sería posible emplear los perfiles de velocidad como estimadores de dicha reducción, y, como objetivo último, poder contar con otro parámetro que puede servir para la estimación de la seguridad.

Sin embargo, y tal y como enunció Hirsh (1987), lo comentado anteriormente no es cierto. La reducción de velocidad de percentil 85 no es la resta directa de las velocidades de percentil 85 de dos alineaciones, ya que al hacer esta operación no se está considerando a un mismo conductor en cada una de las mismas. Además, las distribuciones de velocidad de ambas alineaciones no son las mismas.

A partir de este estudio, llegaron a la conclusión de que el percentil 85 de la máxima reducción de la velocidad es sustancialmente mayor que la resta de las velocidades de percentil 85.

Existen diversos estudios encaminados a verificar realmente de qué depende la mayor o menor reducción de la velocidad a la salida de una recta y entrada a una curva. Se han definido nuevas variables e incluso se han calibrado modelos para estimar dicha reducción.

Las variables utilizadas para el estudio del diferencial de velocidad entre elementos consecutivos son:

- $\Delta_{85}V$, enunciado por primera vez por Misaghi (2003). Indica diferencial de velocidad que no es superado por el 85 % de los vehículos en condiciones de flujo libre. Esta variable se calcula como el percentil 85 de la distribución de Δv_i , donde Δv_i es el decremento desde la velocidad de la recta precedente a la curva para el vehículo i .
- ΔV_{85} . Este parámetro representa el incremento de las velocidades de operación de percentil 85. Su obtención es por sustracción directa, partiendo de modelos discretos de estimación de la velocidad de operación o de un modelo continuo.

$$\Delta V_{85} = v_{85,i+1} - v_{85,i} \quad (23)$$

- $85MSR$. Esta variable fue definida por primera vez por McFadden y Elefteriadou (2000). Se define la variable $85MSR$ como el percentil 85 de las máximas reducciones de velocidad individuales a lo largo de una sección formada por los últimos 200 metros de la recta de aproximación y el punto medio de la curva. Cada reducción máxima de velocidad es tomada como la diferencia entre la máxima velocidad en la recta de aproximación y la mínima velocidad en la curva para un conductor individual.

$$85MSR = (\max \Delta v_i)_{85} \quad (24)$$

Esta variable estudia el mismo aspecto que la variable $\Delta_{85}V$. Bella (2008) realizó un estudio comparativo entre estas dos variables empleando simuladores de tráfico. La relación calibrada entre estas dos variables, que presentaban un alto coeficiente de correlación (92 %) fue la mostrada en la ecuación 25.

$$85MSR = 6.35 + 1.08 \cdot \Delta_{85}v \quad (25)$$

- $85MSI$. Diferencial de velocidad de operación calculado como el percentil 85 de los máximos incrementos de velocidad. Cada incremento de velocidad en la distribución se toma como la diferencia entre la máxima velocidad en la recta de salida y la mínima velocidad en la curva para cada conductor individual.

En el estudio de las variaciones de velocidad en las transiciones recta-curva, se ha analizado tanto las relaciones de las variables citadas con distintas características geométricas del trazado como las relaciones existentes entre las propias variables.

Así, existen diferentes modelos que permiten estimar el valor de uno de estos parámetros en función de alguno de los otros 3 parámetros. En la tabla 3.10 se resumen los modelos más relevantes en este ámbito.

Año	Autor (es)	Modelo	R ²
2005	Misaghi y Hassan	$\Delta_{85}V = 0.97 \cdot \Delta V_{85} + 7.55$	0.72
2008	Bella	$85MSR = 6.35 + 1.08 \cdot \Delta_{85}v$	0.92
2011	Castro et al.	$\Delta_{85}V = 4.497 + 0.704 \cdot \Delta V_{85}$	0.74

Tabla 3.10 Relación entre parámetros referentes a diferenciales de velocidad

Por otra parte, como ya se ha citado, se han desarrollado distintos modelos para estimar los valores de estos parámetros en función de características geométricas del trazado (ver tabla 3.11).

Año	Autor (es)	Modelo	R ²
2005	Misaghi y Hassan	$\Delta_{85}V = -83.63 + 0.93 \cdot v_T + e^{-8.93 + \frac{3507.10}{R}}$	0.64
2005	Misaghi y Hassan	$\Delta_{85}V = -198.74 + 21.42 \cdot \sqrt{v_T} + 0.11 \cdot \Delta - 4.55 \cdot SW - 5.36 \cdot (curve_dir) + 1.30 \cdot G + 4.22 \cdot (drv_flag)$	0.89
2007	Nie y Hassan	$\Delta V_{85} = -5.326 + 0.073 \cdot CCR$	0.57
2007	Nie y Hassan	$\Delta_{85}V = -4.540 + 0.088 \cdot CCR$	0.75
2007	Nie y Hassan	$85MSR = -0.658 + 0.107 \cdot CCR$	0.76
2007	Bella	$85MSR_{t-c} = -0.198 + 0.037 \cdot L + \frac{7929.37}{R}$	0.49
2007	Bella	$85MSR_{t-c} = -77.74 + 0.711 \cdot v_T + 0.01 \cdot L + \frac{6113.89}{R}$	0.89
2007	Bella	$85MSR_{t-c} = -83.48 + 0.782 \cdot v_T + \frac{6016.15}{R}$	0.87
2011	Castro et al.	$\Delta_{85}V = -82.359 + 0.009 \cdot R + 9.946 \cdot \sqrt{v_T} + e^{-8.232 + 0.223 \cdot \Delta}$	0.67

Donde:

Δ : ángulo de deflexión de la curva circular, en grados sexagesimales.
 G : pendiente media.

v_T : velocidad de la recta precedente.
 SW : ancho del arcén (m).
 $curve_dir$: dirección de la curva (1 izquierda, 0 derecha).
 drv_flag : intersección en la curva: 1, otro caso: 0
 CCR : tasa de cambio de curvatura
 $85MSR_{t-c}$: estimador del parámetro $85MSR$ obtenido del simulador de conducción

Tabla 3.11 Modelos para la estimación de parámetros referentes a diferenciales de velocidad

De los modelos calibrados por Misaghi y Hassan (2005), a partir de 35 contactos entre curva y recta con al menos 100 mediciones de decrementos en cada uno de ellos, se pueden obtener diferentes conclusiones.

Del primero de ellos se extrae que el radio de la curva es muy influyente sobre los decrementos de velocidad de operación hasta aproximadamente 450 m, ya que posteriormente no se aprecia su efecto. Además, el aumento de la velocidad de la recta precedente supone un aumento prácticamente uniforme en los valores de la reducción de velocidad.

Del mismo modo, el segundo modelo muestra como a medida que la velocidad de la recta aumenta, el descenso de velocidad también lo hace. Los decrementos también aumentan al aumentar el ángulo de deflexión, cuando la curva es a izquierdas y cuando los arcones son más estrechos, las pendientes más pronunciadas y hay presencia de bordillos rebajados en las aceras.

Los anteriores modelos se calibraron a partir de un número bastante reducido de transiciones recta-curva, pero bastante mayor que el número de transiciones utilizadas para el modelo de Nie y Hassan (2007) que fue de tan sólo 6 transiciones recta-curva y únicamente 25 observaciones por localización.

Respecto a los modelos presentados por Bella (2007) cabe decir que el segundo de ellos presenta un alto coeficiente de correlación debido a la introducción de la velocidad en la recta precedente como variable independiente. Esta variable, al ser de origen tan diferente al resto, supone un origen totalmente diferente a la reducción de velocidad de operación, explicando mucha de la variabilidad del modelo. Sin embargo, a la hora de estimar la reducción de la velocidad de operación se trata de una variable de la que no es inmediato su conocimiento ya que es necesario medirla empíricamente o, en fase de proyecto, determinarla mediante un modelo discreto de velocidades de operación en rectas (los cuales presentan correlaciones mucho menores con la realidad).

Por otra parte, dada la correlación entre la longitud de la recta y la velocidad de operación de la misma, se decidió calibrar un tercer modelo que eliminaba la variable L de los anteriores. En este modelo se perdió algo de correlación, pero la diferencia es tan mínima que el modelo final resulta equivalente al segundo, con la ventaja de no presentar multicolinealidad.

Además de estos modelos, cabe destacar el estudio realizado por Park et al. (2010) para la estimación de las diferencias de velocidades en una carretera inurbana. En él compararon cuatro modelos para estimar el diferencial medio de velocidad: dos

modelos de regresión simple, un modelo múltiple convencional y un modelo múltiple de Bayes. Consideraron la opción de utilizar un modelo múltiple porque los datos usados en los modelos presentan dos niveles:

- Datos grupales, como son las características geométricas de la vía (longitud de la recta, radio de la curva circular).
- Datos individuales que son aquellos que miden la velocidad individual de los vehículos.

Dichos modelos fueron elaborados a partir de datos de 18 secciones recta-curva en carreteras de dos carriles de circulación, tomando los datos de velocidad en la recta 200 metros antes de la misma y los datos de velocidad de la curva en su punto medio. El número de vehículos por sección recta-curva varió entre 18 y 68, haciendo un total de 602 vehículos. Esta muestra con tan pocos individuos es debida a la consideración de 10 segundos de intervalo como flujo libre. Los resultados mostraron empíricamente que los modelos múltiples aumentan la precisión en la estimación de las diferencias de velocidades, posiblemente con menos datos.

3.5.4. Modelización de las tasas de deceleración y aceleración

Anteriormente se han explicado y enunciado diversos modelos para el cálculo de las velocidades de operación en rectas y en curvas, mostrando también las variables de las que dependen.

También se ha enunciado el objetivo final de dichos modelos: la obtención de un perfil continuo de las velocidades de operación en un determinado tramo. Se explicó de igual modo que es necesario laminar los saltos bruscos de velocidades en dicho perfil, empleando tasas de deceleración y aceleración.

El objetivo de estas tasas es, en dichos perfiles, el ajuste de la longitud (y en ocasiones, la zona) donde se produce el cambio de velocidad.

Las tasas de deceleración y especialmente las de aceleración están asociadas al confort del conductor, ya que sobre la comodidad de las personas que circulan en el interior de un vehículo una de las variables que influye de forma fundamental es la aceleración que sufren.

La deceleración, además, está fundamentalmente ligada con la siniestralidad. Los puntos donde se dan las máximas reducciones de la velocidad (85MSR, por ejemplo), serán donde se producen las máximas deceleraciones, estando comprobado que existe una relación entre dicho fenómeno y la accidentalidad.

Por todo ello, el estudio de las tasas de deceleración y aceleración es importante desde dos puntos de vista: el conformar un perfil de velocidades adecuado y la obtención de transiciones que no impliquen valores muy elevados de los mismos, con el objetivo de limitar la accidentalidad.

Estas tasas son unas variables tradicionalmente poco estudiadas, e incluso en muchos perfiles de velocidad y estudios se han empleado valores teóricos y antiguos.

En los últimos años ha aumentado el interés por estos valores, y ha aumentado el número de estudios acerca de los mismos. De hecho, muchos de los estudios en este campo no están encaminados a la obtención de modelos de calibración de estos valores, sino a un paso previo: el estudio del comportamiento de los valores de deceleración y aceleración en diferentes condiciones.

Los primeros estudios sobre estos parámetros obtuvieron valores estáticos, calibrados para emplear en la totalidad de los casos. Los modelos estáticos más conocidos son:

- Lamm et al. (1988). Los resultados, obtenidos a partir del estudio de 6 curvas, mostraron que la aceleración finaliza y la deceleración comienza en torno a 210-230 metros antes del inicio o después del final de la sección de curva. Las tasas de aceleración y deceleración observadas en este estudio variaban entre 0.85 y 0.88 m/s^2 . Debido al reducido intervalo de las mismas, la conclusión del estudio fue un valor único para ambas tasas de 0.85 m/s^2 .
- Kockelke y Steinbrecher (1987). Las tasas de aceleración y deceleración observadas fueron en la práctica mayoría de casos inferiores a 1,00 m/s^2 , aunque en algún caso se llegaron a registrar valores de 2,50 m/s^2 .
- Collins y Krammes (1996). La tasa de aceleración obtenida se situaba entre 0,12 y 0,52 m/s^2 , mientras que la de deceleración se situó entre 0,35 y 1,19 m/s^2 . En base a dichos datos, se postuló que la tasa de deceleración no era significativamente diferente a las propuestas por Lamm et al. (1998) e incluidas en el *IHSDM*, mientras que las tasas de aceleración de Lamm (1998) sobreestiman las reales.

Posteriormente, comenzaron a aparecer modelos de estimación de los valores de deceleración y aceleración que obtenían valores únicos para una transición, en función de variables locales.

Los estudios más recientes en este campo están encaminados a la obtención de modelos de estimación de tasas de deceleración y aceleración variables según las condiciones locales y variables, también dentro de una maniobra de deceleración o aceleración en particular.

Uno de los estudios más amplios y recientes en este aspecto, siendo también uno de los primeros en emplear relaciones no estáticas para obtener los valores de deceleración y aceleración, pertenece a Fitzpatrick et al. (2000).

A partir de un gran número de datos obtenidos, se desarrollaron diversos ajustes, obteniendo un bajo coeficiente de significancia para los modelos de regresión. Por ello, se planteó finalmente un ajuste mediante una función por tramos.

La casuística desarrollada se resume en tabla 3.12, extraída del documento original.

AC EQ# (See note 1)	Alignment Condition (AC) (see note 2)	Speed (see note 2)	Deceleration Rate (see note 2)	Acceleration Rate (see note 2)
1.	Horizontal Curve on Grade: $-9\% \leq G < -4\%$	$V_{85} = 102.10 - \frac{3077.13}{R}$	For AC EQ 1 to 4 $R \geq 436$ $d = 0.00$ $175 \leq R < 436$ $d = 0.6794 - \frac{295.14}{R}$ $R < 175$ $d = 1.00$	For AC EQ 1 to 4 $R > 875$ $a = 0.00$ $436 < R \leq 875$ $a = 0.21$ $250 < R \leq 436$ $a = 0.43$ $175 < R \leq 250$ $a = 0.54$
2.	Horizontal Curve on Grade: $-4\% \leq G < 0\%$	$V_{85} = 105.98 - \frac{3709.90}{R}$		
3.	Horizontal Curve on Grade: $0\% \leq G < 4\%$	$V_{85} = 104.82 - \frac{3574.51}{R}$		
4.	Horizontal Curve on Grade: $4\% \leq G < 9\%$	$V_{85} = 96.61 - \frac{2752.19}{R}$		
5.	Horizontal Curve Combined with Sag Vertical Curve	$V_{85} = 105.32 - \frac{3438.19}{R}$	1.00	0.54
6.	Horizontal Curve Combined with NLS D Crest Vertical Curve	(see note 3)	(see note 5)	(see note 5)
7.	Horizontal Curve Combined with LSD Crest Vertical Curve (i.e., $K \leq 43$ m/%) (see note 4)	$V_{85} = 103.24 - \frac{3576.51}{R}$	1.00	0.54
8.	Sag Vertical Curve on Horizontal Tangent	$V_{85} = \text{assumed desired speed}$	n/a	n/a
9.	Vertical Crest Curve with NLS D (i.e., $K > 43$ m/%) on Horizontal Tangent	$V_{85} = \text{assumed desired speed}$	n/a	n/a
10.	Vertical Crest Curve with LSD (i.e., $K \leq 43$ m/%) on Horizontal Tangent	$V_{85} = 105.08 - \frac{149.69}{K}$	1.00	0.54

NOTES:

n/a = not available; NLS D = nonlimited sight distance; LSD = limited sight distance.

- AC EQ# = Alignment Condition Equation Number
- Where: V_{85} = 85th percentile speed of passenger cars (km/h) K = rate of vertical curvature
 R = radius of curvature (m) G = grade (%)
 d = deceleration rate (m/s^2) a = acceleration rate (m/s^2)
- Use lowest speed of the speeds predicted from AC EQ# 1 or 2 (for the downgrade) and AC EQ# 3 or 4 (for the upgrade).
- In addition, check the speeds predicted from AC EQ# 1 or 2 (for the upgrade) and AC EQ# 3 or 4 (for the upgrade) and use the lowest speed. This will ensure that the speed predicted along the combined curve will not be better than if just the horizontal curve was present (i.e., that the inclusion of a limited sight distance crest vertical curve result in a higher speed).
- Use acceleration/deceleration rates for Alignment Conditions 1 to 4.

Tabla 3.12 Modelos de estimación de la velocidad de operación de Fitzpatrick et al. (2000)

Estos modelos proporcionan unas tasas de aceleración y de deceleración máximas de $0,54 \text{ m/s}^2$ y $1,0 \text{ m/s}^2$, respectivamente. Sin embargo, las observaciones realizadas en campo proporcionaron datos de 1.77 m/s^2 y 1.44 m/s^2 , con lo que se concluye que pueden observarse valores mayores en la práctica que los proporcionados por estas fórmulas.

Valores similares obtuvieron Crisman et al. (2005) que, a partir de observaciones empíricas, calibraron los valores de tasas de deceleración y aceleración, en función del radio de la curva, que se muestran en la tabla 3.13.

Radio (m)	Deceleración (m/s ²)	Aceleración (m/s ²)
$R < 178$	1.00	0.54
$178 \leq R < 437$	0.50	0.43
$437 \leq R < 2187$	0.20	0.20

Tabla 3.13 Tasas de deceleración/aceleración obtenidas por Crisman et al. (2005)

En 2006, Perco y Robba llevaron a cabo un estudio centrado únicamente en la deceleración, a partir de datos tomados en 10 tramos compuestos por una recta y una curva a continuación. Su importancia radica en que se centra en el estudio del modo en el cual se decelera en el contacto entre una recta y la siguiente curva, obteniendo un comportamiento de la misma. Sin embargo, no estudia la variación de las tasas de deceleración entre diferentes casos, ofreciendo un comportamiento único para todas las deceleraciones. Mediante un estudio detallado, se observó que las distribuciones de velocidad son mayores en las rectas, existiendo una mayor coincidencia en la curva (la frecuencia es mayor y la dispersión disminuye).

Se estudió la variación de las velocidades media y de percentil 85, obteniendo los siguientes resultados:

- Deceleración media, velocidad media: 0,54 m/s².
- Deceleración máxima, velocidad media: 0,84 m/s².
- Deceleración mínima, velocidad media: 0,30 m/s².
- Deceleración media, velocidad de percentil 85: 0,71 m/s².
- Deceleración máxima, velocidad de percentil 85: 1,16 m/s².
- Deceleración mínima, velocidad de percentil 85: 0,35 m/s².

Debido a la mayor dispersión de las velocidades en las rectas, se puede ver cómo las tasas de deceleración para la velocidad de percentil 85 son mayores que las de la velocidad media.

Una vez determinadas las tasas de aceleración para diferentes casos, se procedió a analizar el comportamiento de los conductores a lo largo de cada deceleración. Los resultados mostraron que existe una gran diferencia entre la mayor y la menor tasa de deceleración, lo cual parece indicar que el proceso de deceleración es variable a medida que el conductor se aproxima a la curva.

Dicha deceleración parece producirse en dos fases, cuya explicación a priori podría ser la siguiente:

- En una primera fase, el conductor detecta que la curva se encuentra suficientemente cerca como para poder dejar de pisar el acelerador.
- En una segunda fase, el conductor pisa el freno. Es en esta fase donde se produce la deceleración máxima.

Se comprobó la existencia estadística de esta separación entre fases, observando que la muestra de deceleraciones de la fase 2 pertenece a una población diferente de las aceleraciones medias para todo el recorrido.

Como conclusiones de este estudio se pueden extraer, principalmente, las siguientes:

- Los valores estimados por Lamm ($0,85 \text{ m/s}^2$) no son muy diferentes de las tasas de deceleración para la velocidad media, pero sí lo son para la velocidad de percentil 85.
- La deceleración se produce en dos fases, siendo la tasa de deceleración de la segunda fase la más parecida a la estimada por Lamm.

Un año después Figueroa y Tarko (2007) presentaron un estudio que formaba parte de otro más amplio encaminado a obtener un modelo de transición de velocidad mediante un proceso de calibración iterativo. Para iniciar la iteración se calcularon la deceleración y la aceleración media a partir de los datos registrados en 9 emplazamientos.

El valor de deceleración medio fue de $0,42 \text{ m/s}^2$. Este valor se consideró muy pequeño, por lo que se procedió a distinguir qué emplazamientos provocaban una deceleración nula o insignificante. Cinco de los nueve emplazamientos provocaban una deceleración estadísticamente nula. El valor medio de la deceleración en el resto de los sitios fue de $0,69 \text{ m/s}^2$.

Asimismo, el valor de la aceleración calculado fue de $0,23 \text{ m/s}^2$, que se consideró muy reducido. Por ello, se identificaron los cinco lugares en los cuales el valor era estadísticamente comparable a 0, y se realizó la media con el resto. El valor de la aceleración obtenido fue de $0,37 \text{ m/s}^2$.

Tomando estos valores y los datos de velocidad en recta y en curva, evaluaron la longitud de las secciones de transición, considerando inicialmente que el 85 % de la deceleración y de la aceleración se producía en las rectas.

Tras el proceso de iteración se llegó a dos modelos (ec. 26 y 27), uno para el tramo de aceleración y otro para el tramo de deceleración, que permiten estimar el valor de la velocidad de operación en los puntos de estos tramos de transición.

$$V_d = V_T - 0.6553 \cdot (V_T - V_C) + 0.03299 \cdot l_d \quad R^2 = 0.84 \quad (26)$$

$$V_a = V_T - 0.7164 \cdot (V_T - V_C) + 0.002211 \cdot l_a \quad R^2 = 0.87 \quad (27)$$

Donde:

V_d : velocidad estimada en un punto de la zona de deceleración (ft/s)

V_a : velocidad estimada en un punto de la zona de aceleración (ft/s)

V_T : velocidad en la recta (ft/s)

V_C : velocidad en la curva (ft/s)

l_d : distancia entre el punto en el que se pretende estimar la velocidad y el inicio de la curva (ft)

l_a : distancia entre el punto en el que se pretende estimar la velocidad y el final de la curva (ft)

Como puede verse, estas velocidades dependen de las velocidades en recta y en curva. Para su estimación presentaron en el mismo trabajo un modelo para cada uno de los parámetros.

El modelo de deceleración indica que el 66 % de la longitud de deceleración se produce en la recta anterior a la curva y que la tasa de deceleración media es 0.033 ft/s/ft. Por su parte, el modelo de aceleración indica que el 72 % de la longitud de la aceleración se produce en la recta siguiente a la curva y que la tasa de aceleración media es 0.022 ft/s/ft.

3.5.5. Perfiles de velocidad de operación

En los apartados anteriores se han definido diversos modelos discretos de estimación de velocidades de operación, tanto para rectas como para curvas, además de otras condiciones de alineación (como transiciones, máxima deceleración, etc.).

En este apartado se va a explicar cómo se puede obtener un perfil continuo de velocidad en un tramo, partiendo principalmente de modelos discretos.

Los modelos de perfiles de velocidad habitualmente escogen modelos discretos de estimación de velocidades en curvas y en rectas, para posteriormente unirlos empleando un criterio en cuanto a las tasas de deceleración y aceleración.

Tradicionalmente se ha tendido a configurar un perfil de velocidad siguiendo el método anterior, pero también existen nuevos procedimientos, que serán explicados en el apartado de modelos avanzados.

3.5.5.1. Modelo suizo

Es uno de los primeros perfiles de velocidad desarrollados. Su funcionamiento se basa en la yuxtaposición y calibración de velocidades de sucesivos elementos del trazado: curvas y rectas.

Se determinan en primer lugar las velocidades de operación en las curvas y en las rectas.

La velocidad en las curvas se supone uniforme, por lo que todas las variaciones de la misma tienen lugar en las rectas. Los conductores siempre tenderán a alcanzar la velocidad deseada empleando unas tasas de aceleración y deceleración de 0.85 m/s².

Una versión posterior de este modelo es el de Choueiri y Lamm (1987), empleando otros parámetros.

3.5.5.2. Modelo de Rocci (1993)

En 1993, el profesor Rocci presentó un estudio en profundidad de la velocidad, en el que se analizaron, además de un perfil de velocidad de operación nuevo, cada uno de los componentes que lo integran (velocidad en curvas y en rectas, comportamiento en deceleración y aceleración, etc). El modelo resultante, que fue incluido en el "Libro blanco sobre velocidad, visibilidad y adelantamientos", se corresponde con el utilizado como referencia en la Instrucción 8.1-IC "Señalización vertical" aprobada en 1999, en la que la intensidad de la señalización y balizamiento

de una curva depende del grado de la curva, o diferencia entre la velocidad máxima de aproximación a la curva, y la velocidad máxima en esta.

Según este estudio, una gran parte de los accidentes con víctimas, sobre todo de los mortales, está relacionada con una velocidad inadecuada, derivada no sólo de la inobservancia de las limitaciones establecidas, sino también de una estimación incorrecta de la velocidad a que la carretera puede ser recorrida con seguridad. Por ello, según Rocci, es necesario decidir a qué percentil de la distribución de velocidades se refieren el trazado y la señalización de una carretera. En relación con esta decisión, se plantearon las consideraciones siguientes:

- Un trazado que proporcione una circulación cómoda para los percentiles más altos de velocidad resultaría muy caro. Por tanto, los conductores rápidos deben estar dispuestos a admitir un cierto grado de incomodidad en sus maniobras.
- Sólo una fracción muy pequeña de conductores muy rápidos puede rebasar unas condiciones generales de seguridad, especialmente en lo relativo a maniobras de emergencia; aun así, se trata en general de conductores muy expertos con vehículos de altas prestaciones, y buenas medidas de seguridad activa y pasiva, que pueden tolerar maniobras más bruscas y condiciones más estrictas de seguridad.
- La señalización de las condiciones de seguridad no debe resultar excesivamente restrictiva y, por tanto, menos creíble y poco respetada por una fracción apreciable de los conductores.
- En otros casos, referirse a percentiles altos de la distribución de velocidades resulta excesivo. Así, la velocidad de un vehículo lento al que se pretende adelantar, y desde la cual se inicia una maniobra de adelantamiento desde una posición e seguimiento, debe ser reducida, y tomar valores superiores conduce a distancias de adelantamiento muy elevadas.

En definitiva, se debe establecer un compromiso aceptable entre los costes de construcción y los de explotación (entre los que se encuentran los correspondientes a la accidentalidad), habida cuenta de la diversidad de los comportamientos humanos a los que una infraestructura única pretende servir.

Tras estas consideraciones, se concluyó que en una normativa moderna, este compromiso debería adoptar la forma siguiente:

- Referir a la velocidad V_{85} , los aspectos del diseño de la carretera relacionados con la comodidad de la circulación: maniobras menos bruscas, realizadas con mayor margen.
- La utilización de V_{85} para el diseño debe proporcionar también valores dinámicos aceptables en lo relativo a la seguridad de la circulación de los vehículos más rápidos (V_{99}). Es decir, los conductores cuya velocidad esté comprendida entre V_{85} y V_{99} deben contar con un margen de seguridad aceptable, aunque circulen con mayor incomodidad (maniobras más bruscas o de emergencia).

- Referir a la velocidad V_{99} la señalización de las siguientes condiciones de seguridad estricta propias de la carretera:
 - Máxima velocidad de paso por una curva.
 - Distancia necesaria para la detención ante un obstáculo imprevisto.
 - Aproximación a una zona con restricciones a la circulación, por ejemplo, obras.
 - El resto de la señalización se puede referir a la V_{85} .

Por ello, el estudio teórico presentado abarca dos percentiles de la distribución de la velocidad: el percentil 85, con el que se deberían obtener las características de operación de la vía, y el percentil 99, que indica las máximas condiciones de seguridad para las que se diseña la vía. Los conductores que circulen con una velocidad de operación entre el percentil 85 y 99 circularán en condiciones de seguridad, pero su circulación no será cómoda.

El estudio se basa en la velocidad en curva y en la velocidad de aproximación a la misma, suponiendo que el recorrido de una curva por un vehículo presenta las siguientes fases:

- Deceleración antes de llegar a la curva, con influencia de la inclinación de la rasante. Si la curva anterior está muy próxima y las características de ambas son parecidas, esta fase puede reducirse o llegar a faltar en los tramos de curvas enlazadas.
- Tránsito por la curva a velocidad constante, sin apenas influencia de la inclinación de la rasante.
- Aceleración a la salida de la curva, con influencia de la inclinación de la rasante, hasta alcanzar un límite superior de la velocidad (en caso de que el tramo siguiente sea recto) o iniciar una nueva fase de deceleración. En el caso de curvas enlazadas, esta fase puede reducirse o no existir.

Velocidad en curvas horizontales

El rozamiento transversal movilizado en una curva está relacionado con el radio de curvatura según la expresión de la ecuación 28.

$$f = \frac{v_c^2}{127 \cdot R} - \frac{p}{100} \quad (28)$$

Donde:

f : Rozamiento transversal movilizado.

v_c : Velocidad en la curva (km/h).

R : Radio de curvatura (m).

p : Peralte (%).

Se suele admitir que el diseño de una curva (asociado a la velocidad de percentil 85) se debe basar en unos valores del rozamiento transversal movilizado bastante bajos, que den lugar a una conducción cómoda y sin maniobras bruscas.

Para el diseño basado en la seguridad (empleando el percentil 99 de velocidad de operación) se moviliza un mayor rozamiento transversal, no influyendo en gran cantidad el peralte.

Se considerará como velocidad a la que una curva de radio R (m) y peralte p (%) puede ser recorrida, aquella V_c (km/h) a la que corresponda una aceleración centrífuga no compensada por el peralte, igual a la cuarta parte de la aceleración de la gravedad. De esta forma, la velocidad máxima en curvas, en condiciones de seguridad, se corresponde a la movilización de un rozamiento transversal igual a 0.25 (ver figura 3.5).

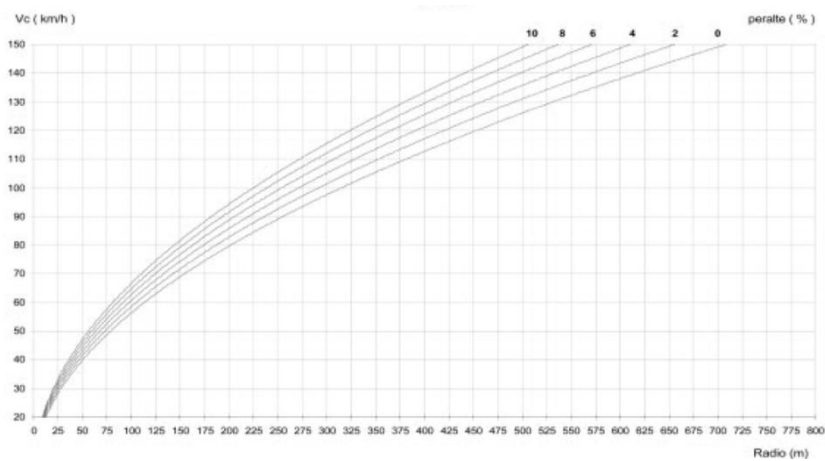


Figura 3.5 Relación entre velocidad, radio y peralte ($f=0.25$)

Parámetros de rozamiento

Resistencia al rozamiento longitudinal

La resistencia al rozamiento longitudinal depende del tipo, estado y humedad del pavimento, estado de los neumáticos y velocidad. Para un pavimento convencional en buen estado, la tabla 3.14 muestra unos valores típicos.

Humedad del pavimento	Estado de los neumáticos	Velocidad (km/h)		
		30	60	90
Seco	Bueno	≈ 1		0.95
	Desgastado			0.90
Ligeramente mojado	Bueno	0.90	0.75	0.68
	Desgastado	0.80	0.50	0.38

Muy mojado	Bueno	0.80	0.70	0.40
	Desgastado	0.75	0.40	0.20

Tabla 3.14 Resistencia al rozamiento longitudinal

Para velocidades normales, neumáticos en buen estado y pavimento ligeramente mojado, los datos de la tabla anterior pueden obtenerse aproximadamente mediante la siguiente fórmula de la ecuación 29.

$$\mu_l = 0.86 - \frac{v}{500} \tag{29}$$

Donde:

v = velocidad (km/h).

Resistencia al rozamiento transversal

La resistencia al rozamiento transversal depende del tipo, estado y humedad del pavimento, estado de los neumáticos y velocidad. Para un pavimento convencional en buen estado, la tabla 3.15 muestra los valores típicos.

Humedad del pavimento	Estado de los neumáticos	Velocidad (km/h)		
		30	60	90
Seco	Bueno	≈ 1		0.95
	Desgastado			0.90
Ligeramente mojado	Bueno	0.60	0.40	0.30
	Desgastado	0.35	0.20	0.10
Muy mojado	Bueno	0.55	0.25	0.12
	Desgastado	0.30	0.12	0.05

Tabla 3.15 Resistencia al rozamiento transversal

Estos valores pueden aproximarse mediante las ecuaciones de la tabla 3.16.

Humedad del pavimento	Estado de los neumáticos	μ
Seco	Bueno	$\mu = 1.004 - \frac{v}{2500}$
	Desgastado	$\mu = 1.007 - \frac{v}{1400}$
Ligeramente mojado	Bueno	$\log \mu = -\frac{v}{200} - 0.07$
	Desgastado	$\log \mu = -\frac{v}{111} - 0.19$

Muy mojado	Bueno	$\log \mu = -\frac{v}{100}$
	Desgastado	$\log \mu = -0.13 \left(\frac{v}{10} + 1 \right)$

Tabla 3.16 Obtención de los coeficientes de rozamiento transversal

Parámetros de deceleración

Tras detectar los conductores la necesidad de decelerar, transcurre un tiempo de percepción y reacción, durante el cual la velocidad no varía. Una vez pasado este tiempo se decelera hasta alcanzar la velocidad del nuevo tramo.

Las tasas de deceleración dependen de diversos parámetros, como la velocidad inicial y el motivo de la deceleración. Con ello se llegará a dos modelos de deceleración.

Velocidad inicial

Se suele tomar V_{85} en las maniobras en las que la condición determinante es la comodidad. En caso de que la condición determinante sea la seguridad, se debe tomar la velocidad de percentil 99.

Deceleración admisible

Este valor es diferente dependiendo del tipo de maniobra:

- Maniobra de emergencia. La velocidad inicial a considerar es la de percentil 99. Se puede alcanzar una deceleración igual a la proporcionada por la acción conjunta de la inclinación de la rasante y de la resistencia al rozamiento longitudinal del pavimento (μ) (el cual depende de los mismos parámetros de los que depende el rozamiento transversal).
- Maniobra deliberada. Relacionadas con la velocidad de operación de percentil 85. No se deben exceder los rozamientos movilizables mediante una suave aplicación de los frenos, del orden de 0.25.
- Maniobra subconsciente. No se suele movilizar un rozamiento superior a 0.175, el cual se alcanza sin movilizar los frenos (únicamente dejando de acelerar).

Modelo de deceleración

También se diferencia entre los tipos de maniobras anteriores. Para las maniobras de emergencia y deliberadas se ajusta un modelo cuadrático, mientras que para las maniobras subconscientes se ajusta mejor un modelo de orden sesquiáltero.

Modelo de deceleración cuadrático (ver ec. 30).

$$\frac{v}{v_c} = \sqrt{N^2 - (N^2 - 1) \cdot \frac{s}{d}} \quad (30)$$

Modelo de deceleración sesquiáltero (ver ec. 31).

$$\frac{v}{v_c} = \sqrt{N^2 - (N^2 - 1) \cdot \left(\frac{s}{d}\right)^2 \cdot \left(3 - 2 \cdot \frac{s}{d}\right)} \quad (31)$$

Los parámetros para ambos modelos son los siguientes:

v : Velocidad en el punto (km/h).

v_c : Velocidad final (km/h).

s : Distancia del punto al inicial (m).

N : Ratio entre la velocidad inicial y la final.

d : Distancia necesaria para decelerar (m).

Las deceleraciones obtenidas son las que se muestran en las ecuaciones 32 y 33, para el modelo cuadrático y sesquilátero, respectivamente.

$$A = \frac{N^2 - 1}{7.2 \cdot d} \cdot v_c^2 \quad (32)$$

$$A = \frac{N^2 - 1}{7.2 \cdot d} \cdot \frac{s}{d} \cdot \left(1 - \frac{s}{d}\right) \cdot v_c^2 \quad (33)$$

En ambos casos la tasa de deceleración (A) está expresada en km/h/s. En el primero de los dos modelos esta tasa es constante, mientras que en el segundo es variable, siendo nula en los extremos y alcanzando un valor máximo (un 50 % superior al medio) en el centro.

La deceleración admisible por la Instrucción 8.1-IC “Señalización vertical” es la considerada para maniobras deliberadas, partiendo de la velocidad de operación de percentil 99.

En función de la deceleración necesaria, dicha instrucción muestra el balizamiento necesario para conseguir que los conductores reaccionen adecuadamente ofreciendo la deceleración requerida, y de esta forma entrar en la curva con suficientes garantías de seguridad.

Parámetros de aceleración

Los parámetros empleados en este caso son los siguientes:

Velocidad inicial

Se suele tomar igual a la velocidad de operación de percentil 85 de la curva anterior, para las maniobras que tienen que ver con la comodidad. En caso de que tengan que ver con la seguridad (como alcanzar la velocidad de aproximación a la curva siguiente), se debe considerar la velocidad de percentil 99.

Aceleración admisible

La máxima aceleración disponible viene en función de las prestaciones del vehículo y de la destreza del conductor. Se desarrolló en España un estudio con un vehículo

tipo en 1.993, con un peso de 1080 kg, motor de gasolina de 100 CV, velocidad máxima de 175 km/h.

En cuanto a las maniobras deliberadas, al estar relacionadas con la comodidad, movilizan valores medios de la aceleración que no suelen exceder los 4 km/h/s.

Modelo de aceleración

También distingue entre maniobras en condiciones de máximas prestaciones y maniobras deliberadas.

A la salida de curvas, en condiciones de máximas prestaciones, se pueden distinguir dos fases:

- Al principio, la combinación de curvatura y peralte puede impedir que el vehículo desarrolle toda su capacidad de aceleración, pues podría sobrepasar el valor del rozamiento movilizado admisible. La velocidad en este caso viene dada por la ecuación 34.

$$v = \sqrt{127 \cdot R \cdot [p + f_{max}(v)]} \quad (34)$$

- A partir de cierto punto en que la curvatura haya disminuido suficientemente, son determinantes las prestaciones del vehículo.

Se desarrollaron dos modelos de aceleración: un modelo de máximas prestaciones y un modelo cuadrático, para asignar al resto de condiciones.

En el modelo de máximas prestaciones, la ecuación diferencia, definida por la ecuación 35, gobierna el movimiento del vehículo representativo en su aceleración:

$$\frac{1150 \cdot b}{1 - 0.57 \cdot b} \cdot \frac{db}{ds} - 4.65 \cdot i = 0 \quad (35)$$

$$b = 1 - \frac{v}{v_{max}}$$

Donde:

v : Velocidad (km/h).

s : Recorrido desde el reposo (m).

i : Inclinación de la rasante (positiva si sube).

La integración de la anterior ecuación diferencial proporciona las siguientes velocidades en función de la distancia recorrida:

$$s = - \frac{329 \cdot (1 - b)^2 + \frac{1150}{1 + 2.65 \cdot i} \cdot \left[1 - b + \frac{1 - 2 \cdot i}{1 + 2.65 \cdot i} \cdot \ln \frac{(1 + 2.65 \cdot i) \cdot b - 4.65 \cdot i}{1 - 2 \cdot i} \right]}{1 + 2.65 \cdot i} \quad (36)$$

Puesto que este modelo comienza desde el reposo, la aplicación a los perfiles de velocidad no es directa. Para poder considerarla en los perfiles de velocidad, hace falta evaluar este perfil por completo, para aplicarlo al perfil desde el punto en que la velocidad es la de operación del tramo anterior.

Por otra parte, a la mayoría de las maniobras que no se realizan en condiciones de máximas prestaciones, se les ajusta bien un modelo cuadrático (ver ecs. 37 y 38).

$$s = \frac{v_0 + v}{7,2} \cdot t \quad (37)$$

$$A = \frac{v - v_0}{t} \quad (38)$$

Donde:

v_0 : Velocidad inicial (km/h).

v : Velocidad en el punto (km/h).

t : Tiempo transcurrido desde el inicio (s).

s : Distancia desde el punto al inicial (m).

A : Aceleración media (km/h/s).

Velocidad de operación en las rectas

Una vez determinadas las velocidades de operación en las curvas, y tras haber desarrollado los parámetros necesarios para calcular las aceleraciones y deceleraciones en función de diversas circunstancias y características, se puede proceder a calcular las velocidades en las rectas, aplicando los datos anteriores. El esquema a considerarse muestra en la figura 3.6.

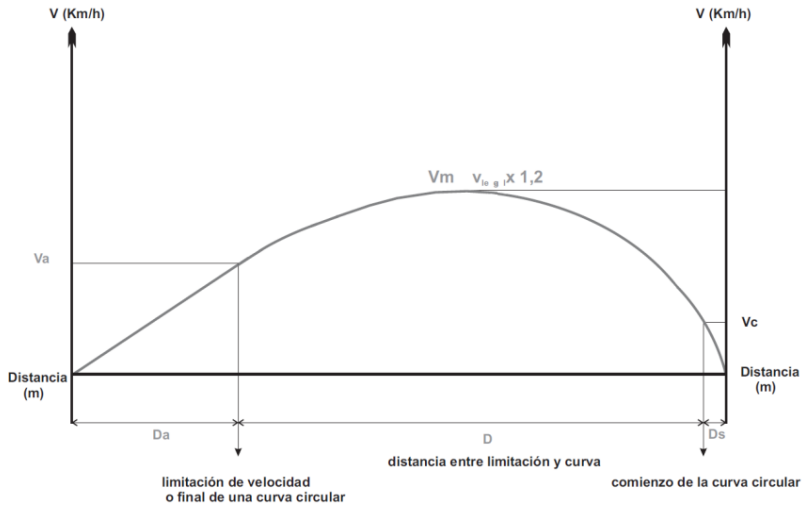


Figura 3.6 Esquema de obtención de las velocidades de operación en rectas, Rocci (1993)

Este cálculo se realiza en los siguientes pasos:

- Determinación de la velocidad en la curva anterior (v_a), mediante los datos del radio y el peralte.

- Determinación de la velocidad en la curva posterior (v_c), mediante los datos del radio y el peralte.
- La distancia de aceleración desde el reposo (D_a) se obtendrá mediante la expresión de la tasa de aceleración para el modelo de máximas prestaciones. Se puede emplear el gráfico de la figura 3.7.

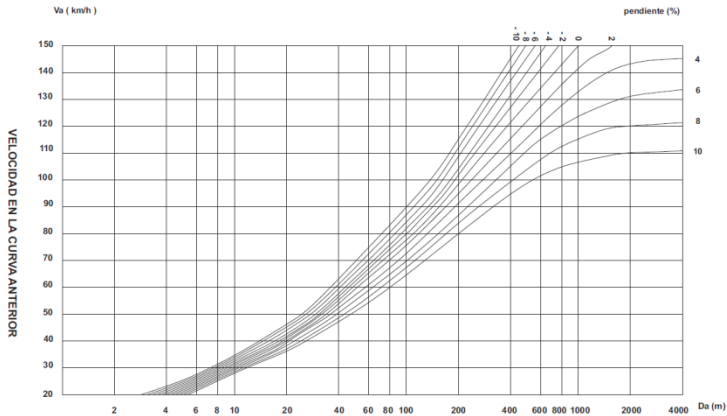


Figura 3.7 Gráfico de ajuste por aceleración desde la curva anterior (Rocci, 1993)

- La distancia empleada para decelerar (D_s) se calcula mediante el valor de la velocidad final y la pendiente de la rasante, empleando una tasa de deceleración de 7 km/h/s. Se puede determinar mediante el gráfico de la figura 3.8.

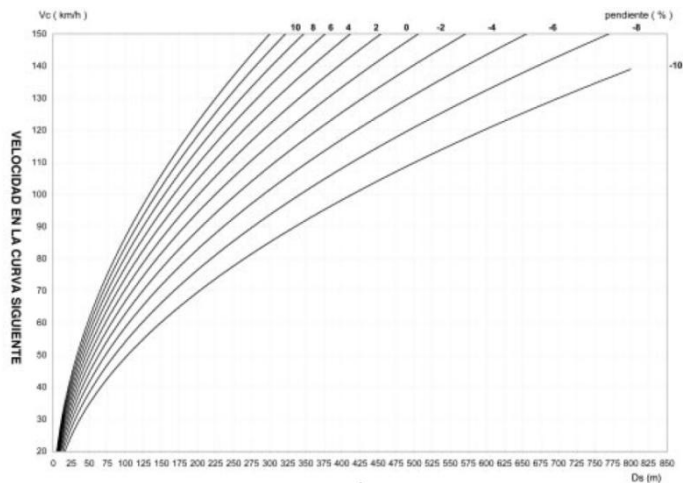


Figura 3.8 Gráfico de ajuste por deceleración hasta curva siguiente (Rocci, 1993)

- La velocidad máxima (v_m) se calcula entrando con D_a , D_s y la distancia entre la limitación inicial y el comienzo de la curva en el gráfico mostrado en

la figura 3.9. Esta velocidad se ha estimado como la velocidad legal incrementada en un 20 %.

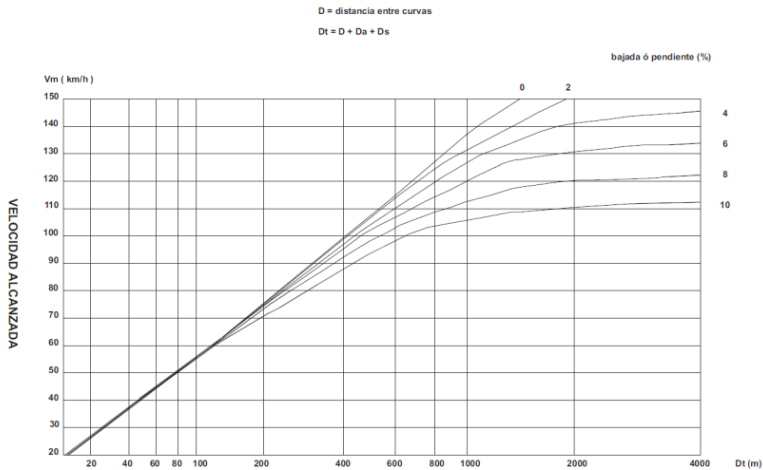


Figura 3.9 Gráfico de velocidad entre curvas (Rocci, 1993)

3.5.5.3. Modelo de Ottesen y Krammes (2000)

Hipótesis básica y modelos empleados

Al igual que los modelos anteriores, este está basado en calcular en primer lugar las velocidades en rectas y curvas y posteriormente configurar el perfil uniéndolas empleando diferentes tasas de deceleración y aceleración. Se evaluó también la posibilidad de crear un modelo que en vez de evaluar la velocidad en las curvas, calculara la reducción de velocidad en la interface recta-curva. Este modelo no se llegó a crear debido a que su concepción es más compleja que el finalmente creado.

La velocidad en las curvas se supone constante, mientras que en las rectas se supone que se tiende a alcanzar la velocidad deseada. Todas las transiciones de velocidad se desarrollan en los tramos de recta.

La velocidad deseada en este modelo se estimó como un valor único de 97,9 km/h. El modelo empleado para calcular las velocidades en las curvas fue el de Ottesen y Krammes (2000).

Se emplearon las tasas de deceleración y aceleración de Lamm (1988) (en los dos casos 0,85 m/s²).

Debido al empleo de dos modelos (uno para estimar las velocidades en las curvas y otro para las rectas) de diferente origen, se tuvo que corregir algún resultado del modelo. Así, en los casos en que la velocidad en las curvas fuese superior a la velocidad deseada, se corrigió la velocidad de la curva para coincidir con la deseada.

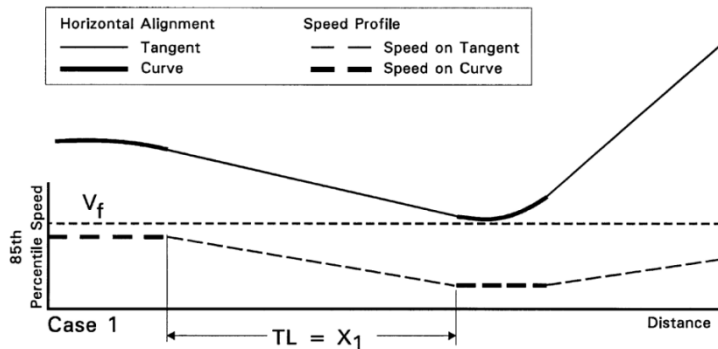
Al igual que otros modelos de perfil de velocidad, el ajuste de las aceleraciones se realiza centrándose en analizar cada una de las rectas del mismo.

Ajuste del perfil

Una vez calculadas las velocidades en curvas y rectas, es necesario laminar el perfil con las tasas de deceleración y aceleración.

En función de la longitud de la recta entre dos curvas, pueden distinguirse tres posibles situaciones (ver figura 3.10):

- La longitud de la recta entre curvas sucesivas es reducida de tal forma que el conductor, tras salir de una curva con una velocidad de operación v_1 adopta una aceleración o deceleración constante para entrar en la siguiente curva con una velocidad v_2 , la cual es la velocidad de operación de esta segunda curva.
- La longitud de la recta es mayor que en el caso anterior, permitiendo al conductor acelerar ligeramente para buscar la velocidad de operación en la recta, para posteriormente decelerar y entrar en la segunda curva con su velocidad de operación correspondiente. No se llega a alcanzar la velocidad deseada en la recta. Este caso, a su vez, se puede subdividir en dos: uno en el que se llega a alcanzar en un punto la velocidad deseada, y otro en el que no se alcanza.
- La longitud de la recta es lo suficientemente grande como para permitir al conductor acelerar tras la primera curva, alcanzar la velocidad deseada y mantenerla cierto tiempo, y posteriormente decelerar para adoptarse a las características de operación de la segunda curva.



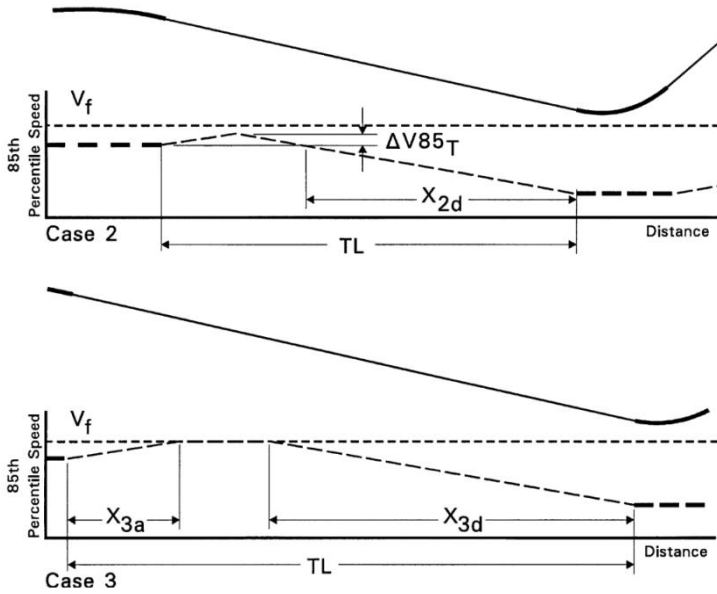


Figura 3.10 Casuística del modelo de perfil de Ottesen y Krammes (2000)

Con el objetivo de diferenciar los tres casos anteriores, se define un nuevo parámetro: la longitud crítica de la recta. Esta longitud es la estrictamente necesaria para que se alcance la velocidad crítica en un punto, pero que no se pueda mantener. Su expresión viene dada por la ecuación 39.

$$L_{crit} = \frac{2 \cdot v_T^2 - v_1^2 - v_2^2}{25.92 \cdot a} \quad (39)$$

Donde:

L_{crit} : longitud crítica de la recta (m)

v_T : velocidad en la recta (km/h)

v_{1-2} : velocidades en las curvas de entrada (1) y salida (2), en km/h

a : tasa de aceleración y deceleración ($0,85 \text{ m/s}^2$)

Una vez calculada la longitud crítica, se puede separar la casuística en los diferentes casos. Estos se resumen en la siguiente tabla 3.17 extraída del documento original.

Case	Condition	Equation	V _f Reached?
1	TL = X ₁	$X_1 = \frac{V85_1^2 - V85_2^2}{25.92 a}$	No
2.1	TL < TL _c	$X_{2d} = \frac{V85_1^2 - V85_2^2}{25.92 a}$ $Max(V85)_{Tan}^* = V85_1 + \Delta V85_{Tan}$ $\Delta V85_{Tan} = \frac{-2V85_1 + [4V85_1^2 + 44.06(TL - X_{2d})]^{\frac{1}{2}}}{2}$ *Note that when calculating $Max(V85)_{Tan}$ the curve with the lower degree of curvature must be selected.	No
2.2	TL = TL _c	$X_{2a} = X_{3a} = \frac{V_f^2 - V85_1^2}{25.92 a}$	Yes, reached but not sustained
3	TL > TL _c	$X_{3a} = \frac{V_f^2 - V85_1^2}{25.92 a}$ $X_{3d} = \frac{V_f^2 - V85_2^2}{25.92 a}$	Yes, reached and sustained
Where: X _{n(a/d)} = distance traveled for Case n during acceleration (a) or deceleration (d) (km/h) V85 _n = 85th percentile speed on curve n (km/h) ΔV85 = difference between the 85th percentile speeds (km/h) a = acceleration/deceleration rate = 0.85 m/s ² TL = tangent length (m) TL _c = critical tangent length (m) V _f = 85th percentile desired speed on long tangents (km/h)			

Tabla 3.17 Ecuaciones para construir el perfil de velocidad correspondiente al percentil 85

Se puede resumir la casuística en la tabla 3.18, en la que se comparan la longitud de la recta con la longitud necesaria para acelerar o decelerar entre dos curvas, o la longitud crítica.

Caso	Longitudes	
	L _{ac/dec}	L _{crit}
1	≤	<
2	>	≤
3	>	>

Tabla 3.18 Casuística del modelo en función de las longitudes crítica y requerida

Modelo avanzado

Con las anteriores especificaciones, el modelo de perfil queda totalmente definido. Sin embargo, existe un defecto importante en el mismo: en muchas ocasiones, la

deceleración antes de una curva comienza en un lugar donde, en la realidad, la futura curva no es visible (y, por tanto, el conductor no puede comenzar a decelerar antes de verla).

De la afirmación anterior se llega a la conclusión de que las tasas de deceleración no son siempre las de Lamm (1988), sino que en alguna ocasión es necesario aplicar tasas más elevadas, para que el conductor pueda entrar en la curva a la velocidad de la misma.

Finalmente, los autores realizan una comparación del modelo con la realidad. Establecen las siguientes comparaciones:

- Para curvaturas inferiores a 5°, el modelo muestra una reducción de la velocidad inferior a la real.
- Para curvaturas superiores a 5°, el modelo estima de forma aproximadamente fiel la reducción de velocidad.
- El modelo avanzado presenta unas desviaciones superiores al modelo original.

3.5.5.4. Modelo de Fitzpatrick y Collins (2000)

Este método se basa en estimar un perfil de velocidad basándose en las velocidades en los tramos curvos, acuerdos verticales (incluyendo combinaciones), la velocidad deseada, ecuaciones TWOPAS (que determinan la velocidad límite a la que es posible conducir en determinado punto), tasas de aceleración y deceleración, además de alguna simplificación.

Este modelo de perfil es un perfeccionamiento del anterior, ya que escoge la menor velocidad de operación de entre tres valores: velocidad deseada, velocidad de operación según cálculos empíricos locales (y posterior adecuación), y la velocidad de operación máxima segura calculada según las ecuaciones TWOPAS.

El funcionamiento del modelo de perfil puede sintetizarse en el gráfico que se muestra en la figura 3.11.

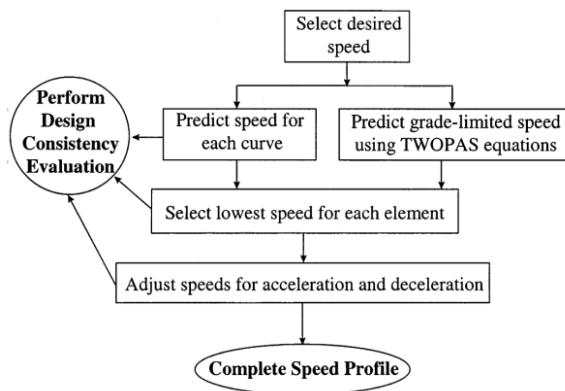


Figura 3.11 Esquema del funcionamiento del modelo de perfil de Fitzpatrick y Collins (2000)

Hipótesis básicas y modelos empleados

Los modelos discretos para rectas empleados en este perfil son la velocidad deseada para la estimación de velocidad en rectas. Esta velocidad deseada se estableció en 100 km/h, basándose en el estudio de Ottesen y Krammes (2000), que la establecieron en 97.9 km/h.

El modelo de estimación de velocidades en las curvas es el de Fitzpatrick (2000).

En cuanto a las aceleraciones y deceleraciones, se emplearon las tasas de Fitzpatrick et al. (2000), aunque en campo se observaron algunos valores mayores.

Se emplearon diversas hipótesis en este modelo:

- La velocidad en las curvas se considera uniforme, por lo que la laminación de las transiciones entre recta y curva se realiza en el tramo de recta. Esta afirmación es válida tanto para las curvas en planta como para los acuerdos verticales, ya que el dominio de definición de este modelo es tanto la planta como el alzado.
- Las tasas de deceleración y aceleración empleadas no recogen la casuística de acuerdos verticales aislados o en combinación con horizontales. Por ello se asumió que las tasas empleadas sean las máximas para curvas horizontales.
- En los casos de acuerdos convexos con distancia de visibilidad limitada, el valor de aceleración puede ser tomado desde la intersección de las alineaciones rectas, ya que en principio, la condición que hace que el conductor reduzca su velocidad ya no existirá, por lo que este comenzará a acelerar desde este punto (y no desde el contacto con la recta vertical).
- La velocidad en las curvas no puede ser superior a la de las rectas. Por ello, en los casos en los que el modelo de estimación de velocidades en las curvas dé velocidades superiores a la deseada, se forzará a que la velocidad de las curvas coincida con la de las rectas.
- El modelo se ha calibrado teniendo en cuenta por separado la alineación horizontal de la vertical, o, en casos en los que se ha combinado, cuando ambas alineaciones están muy solapadas. Por ello, el modelo obtenido es fiel para representar trazados sencillos, pero pierde representatividad cuando se trata de obtener el perfil de velocidad de un trazado complicado.
- Para radios muy pequeños (menores de 100 metros), el modelo de estimación de velocidades en las curvas llega incluso a arrojar velocidades negativas. Por ello se estableció la velocidad mínima en 60 km/h.

Las curvas verticales se clasificaron en cuatro tipos:

- Tipo I: acuerdo convexo típico.
- Tipo II: acuerdo convexo, pero siendo las dos alineaciones verticales rectas del mismo tipo (ambas ascendentes o descendentes).
- Tipo III: acuerdo cóncavo típico.
- Tipo IV: acuerdo cóncavo, siendo las dos alineaciones rectas verticales del mismo tipo (ascendente o descendente).

Ajuste del modelo

El primer paso es obtener y representar las velocidades para rectas y curvas. También se deberá estimar la velocidad límite en el alzado de la alineación empleando las ecuaciones TWOPAS.

En este momento se dispondrá de dos valores de la velocidad en rectas (la velocidad deseada y la obtenida con las ecuaciones TWOPAS) y tres velocidades en las curvas (la velocidad de la curva, la predicha por las ecuaciones TWOPAS y la velocidad deseada, cuyo fin es acotar la máxima velocidad a la que se puede circular).

En este momento se debe seleccionar la menor velocidad de todas para cada PK del perfil, obteniendo por tanto un único valor de velocidad para cada PK. Este perfil obtenido presentará saltos en las velocidades. El paso siguiente consiste en darle una continuidad al perfil, empleando las tasas de deceleración y aceleración. Al igual que en el modelo de perfil anterior, dependiendo de la longitud de la recta y las velocidades en las curvas extremas, pueden distinguirse diversos casos. Para identificar los posibles casos, es necesario enunciar en primer lugar una serie de parámetros:

- Longitud de vía apta para cambios de velocidad (LSC_a). Es la totalidad de la recta entre dos curvas en planta.
- Longitud crítica de la vía necesaria para conseguir la aceleración y deceleración plenas (LSC_c). Es la longitud mínima teórica que tiene que tener una recta para permitir a los conductores acelerar tras la salida de la primera curva (X_{fa}), alcanzar la velocidad deseada (y mantenerla durante un diferencial de tiempo), y posteriormente decelerar hasta alcanzar la velocidad de entrada para la segunda curva (X_{fd}). Las tasas de aceleración y deceleración son las enunciadas anteriormente, es decir, en ningún momento los vehículos experimentan tasas superiores a las proporcionadas por Fitzpatrick (2000). Esta longitud crítica se determina, por tanto, sumando dos elementos:
- Longitud de la vía necesaria para acelerar desde la primera curva hasta la siguiente (X_{ca}). Es la longitud teórica empleada por los vehículos para acelerar tras la salida de la primera curva y llegar a la segunda curva con su velocidad. El concepto contrario (longitud necesaria para decelerar de la primera curva hasta la siguiente) se representa mediante X_{cd} .

En función de la comparación de la longitud de la recta con las longitudes anteriores se pueden distinguir básicamente seis tipos de comportamiento:

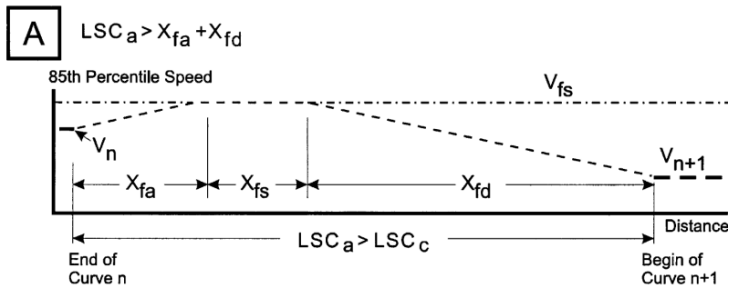
Caso A

Figura 3.12 Caso A (Fitzpatrick y Collins, 2000)

En este caso la longitud de la recta es mayor que la suma de las longitudes necesarias para mantener instantáneamente la velocidad deseada, por lo que los conductores aceleran hasta alcanzar dicha velocidad, la mantienen durante cierto tiempo, y finalmente deceleran para adaptarse a la velocidad de la segunda curva.

Aunque el esquema está propuesto para un caso en el que la velocidad de la segunda curva es menor (y por tanto globalmente se está decelerando), el caso es totalmente general: puede ser que la segunda curva presente una velocidad mayor (con lo que globalmente sería una aceleración).

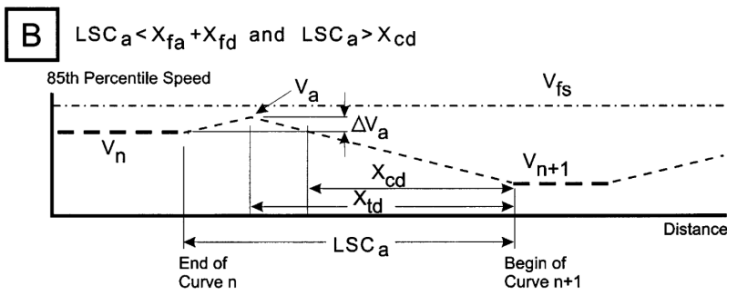
Caso B

Figura 3.13 Caso B (Fitzpatrick y Collins, 2000)

En este caso la longitud de la recta es superior a la estrictamente necesaria para decelerar directamente desde la primera curva, pero inferior a la mínima para alcanzar la velocidad deseada. Por ello los conductores tienden a adaptarse a las tasas de deceleración y aceleración, pero sin llegar a alcanzar la velocidad deseada.

La máxima velocidad que logran en la recta viene determinada por la velocidad en la primera curva más un incremento (ΔV_a). En este caso se ha representado una deceleración global (la velocidad de operación de la segunda curva es inferior a la de la primera). Sin embargo, puede realizarse una analogía para los casos en que globalmente se trate de una aceleración. En estos casos, bastaría por sustituir X_{cd} por X_{ca} .

Caso C

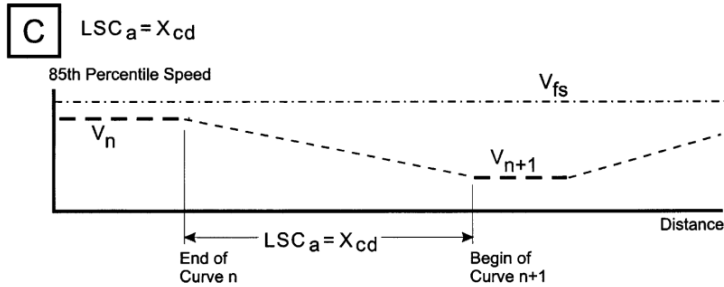


Figura 3.14 Caso C (Fitzpatrick y Collins, 2000)

En este caso (teórico) la distancia de la recta es estrictamente la necesaria para cambiar la velocidad los conductores y adaptarse totalmente a la velocidad en la segunda curva.

Caso D

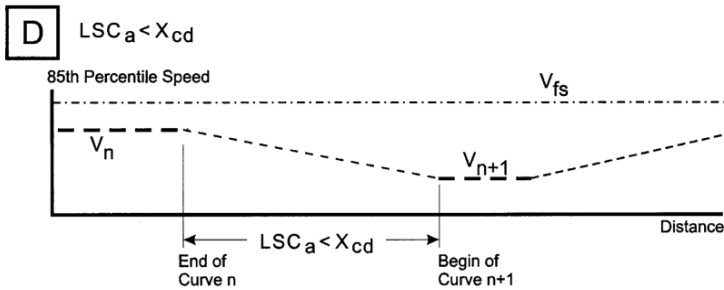


Figura 3.15 Caso D (Fitzpatrick y Collins, 2000)

El caso anterior era totalmente teórico, pues las longitudes de las rectas nunca serán estrictamente idénticas a las necesarias para cumplir las tasas de deceleración teóricas. Es por ello que el caso más real (si no nos encontramos en los casos A ó B) es que la longitud de la recta sea inferior a la necesaria para adaptar el conductor su velocidad de la primera curva a la segunda, con lo que las tasas de deceleración en este caso son mayores que las obtenidas, y por tanto se abandona la seguridad.

Es por ello que se hace necesario indicar a los conductores la necesidad de disminuir bruscamente su velocidad mediante señales indicativas.

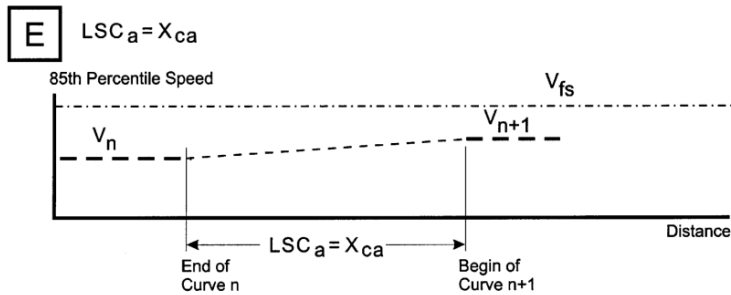
Caso E

Figura 3.16 Caso E (Fitzpatrick y Collins, 2000)

Este caso es teórico, en el cual la longitud de la recta es la estrictamente necesaria como para alcanzar la velocidad de operación estimada en la segunda curva a partir de la primera empleando las tasas de aceleración teóricas.

Obviamente, e igual que ocurría con el caso C para deceleraciones, se trata de una situación teórica que únicamente funciona como frontera entre dos posibilidades de funcionamiento (caso B y F).

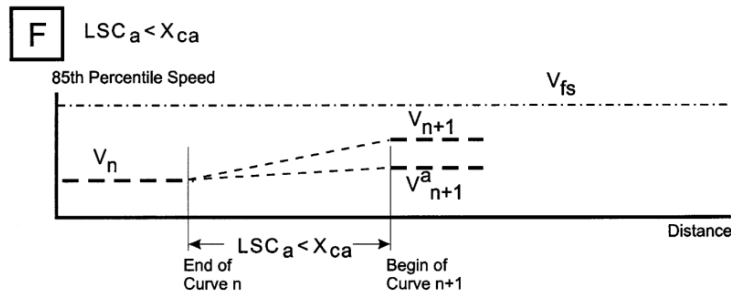
Caso F

Figura 3.17 Caso F (Fitzpatrick y Collins, 2000)

Este caso es análogo al anterior, pero reduciendo la longitud de la recta. A diferencia del caso D (que es el análogo para deceleraciones), en este caso el ajuste de la velocidad no se realiza mediante tasas de aceleración fuera del rango de las observadas, ya que los conductores prefieren acelerar más lentamente y circular por la curva siguiente a una velocidad menor que la permitida, que aplicar una tasa de aceleración superior a la habitual y circular por la segunda curva con su velocidad de operación estándar.

Por tanto, la velocidad de entrada en la siguiente curva vendrá representada como v_{n+1}^a .

De igual modo, es importante señalar que frecuentemente pueden darse rectas de longitudes insuficientes como para desarrollar las velocidades que pueden observarse en campo. Esto puede ser debido a que en este modelo se plantea la

hipótesis de considerar constante la velocidad en las curvas, cuando en la realidad se sabe que también dentro de las curvas la velocidad es variable.

Las variables representadas en los esquemas se calculan mediante las ecuaciones mostradas en la tabla 3.19.

$LSC_c = X_{fa} + X_{fd}$	(1)	$X_{fs} = LSC_a - X_{fd} - X_{fa}$	(6)
$X_{fd} = \frac{V_b^2 - V_{n+1}^2}{25.92 d}$	(2)	$X_{id} = \frac{V_a^2 - V_{n+1}^2}{25.92 d}$	(7)
$X_{cd} = \frac{V_n^2 - V_{n+1}^2}{25.92 d}$	(3)	$V_a = V_n + \Delta V_a$	(8)
Note: when calculating V, the curve with the larger radius is to be used.			
$X_{ca} = \frac{V_{n+1}^2 - V_n^2}{25.92a}$	(4)	$\Delta V_a = \frac{-2V_n + [4V_n^2 + 44.06(LSC_a - X_{cd})]^{\frac{1}{2}}}{2}$	(9)
$X_{fa} = \frac{V_b^2 - V_n^2}{25.92 a}$	(5)	$V_{n+1}^a = V_n + a (LSC_a)$	(10)

Where

- V_f = 85th percentile desired speed on long tangents (m)
- V_n = 85th percentile speed on Curve n (km/h)
- V_{n+1} = 85th percentile speed on Curve n + 1 (km/h)
- V_{n+1}^a = 85th percentile speed on Curve n + 1 determined as a function of the assumed acceleration rate (km/h)
- V_a = maximum achieved speed on roadway between curves in conditions B (km/h)
- ΔV_a = difference between speed on Curve n and the maximum achieved speed on roadway between curves in Condition B (km/h)
- d = deceleration rate, see Table 1 (m/s²)
- a = acceleration rate, see Table 1 (m/s²)
- LSC_c = critical length of roadway to accommodate full acceleration and deceleration (m)
- LSC_a = length of roadway available for speed changes (m)
- X_{fd} = length of roadway for deceleration from desired speed to Curve n + 1 speed (m)
- X_{cd} = length of roadway for deceleration from Curve n speed to Curve n + 1 speed (m)
- X_{id} = length of roadway for deceleration from V_a to Curve n + 1 speed (m)
- X_{ca} = length of roadway for acceleration from Curve n speed to Curve n + 1 speed (m)
- X_{fa} = length of roadway for acceleration from Curve n speed to desired speed (m)
- X_{fs} = length of roadway between two speed limited curves at desired speed (m)

Tabla 3.19 Cálculo de las variaciones necesarias para el desarrollo del modelo

3.5.5.5. Modelo de Easa (2003)

El funcionamiento del modelo es básicamente como el de los anteriores (de hecho está basado en el de Fitzpatrick y Collins, 2000): calibra en primer lugar las velocidades discretas para cada alineación y posteriormente las une empleando diversas tasas de deceleración y aceleración. La novedad de este modelo estriba en que considera la distancia de visibilidad para mostrar cuándo el conductor comienza a decelerar, tanto para curvatura en planta como en alzado.

Hipótesis básicas y modelos empleados

Como velocidad de operación en recta se establece la velocidad deseada, fijada por Easa en unos 100 km/h.

Las velocidades de operación en curvas se estiman mediante el modelo de Fitzpatrick et al. (2000) (asumiendo constancia de las velocidades en las curvas), aunque los autores recomiendan emplear las expresiones de Gibreel et al. (2001) si se quiere obtener mayor precisión y se dispone de los datos necesarios.

También se determinan las velocidades en el alzado, empleando las ecuaciones TWOPAS.

Ajuste del modelo

El primer paso es, al igual que en el modelo de perfil de Fitzpatrick y Collins (2000), obtener un único valor de velocidad para cada PK del trazado. Por ello, se seleccionará, en cada punto del trazado, la velocidad menor de entre la velocidad de operación estimada, la velocidad deseada y la velocidad proporcionada por las ecuaciones TWOPAS.

La longitud de trazado disponible para realizar cambios de velocidad es diferente según la alineación que estemos evaluando. En el caso de haber únicamente curvatura en planta, este valor será la distancia entre los puntos de tangencia de las curvas anterior y posterior. En el caso de que la curvatura sea en combinación, la distancia será entre puntos de tangencia de curvas horizontales y acuerdos convexos con limitación de la distancia de visibilidad.

El resto de curvaturas (acuerdos cóncavos y acuerdos convexos sin limitación de la visibilidad) no coartan sensiblemente la velocidad de operación, por lo que en el modelo se supone que la velocidad de operación coincide con la velocidad deseada, y la longitud disponible para cambios de velocidad incluirá también estas secciones.

En este caso, en función de las longitudes de alineación disponibles para cambios de velocidad y la longitud crítica necesaria para alcanzar la velocidad deseada, se pueden distinguir cinco casos que son los mismos que identificaron Fitzpatrick y Collins (2000), pero con otra ordenación. Los cinco pasos se muestran en la figura 3.18.

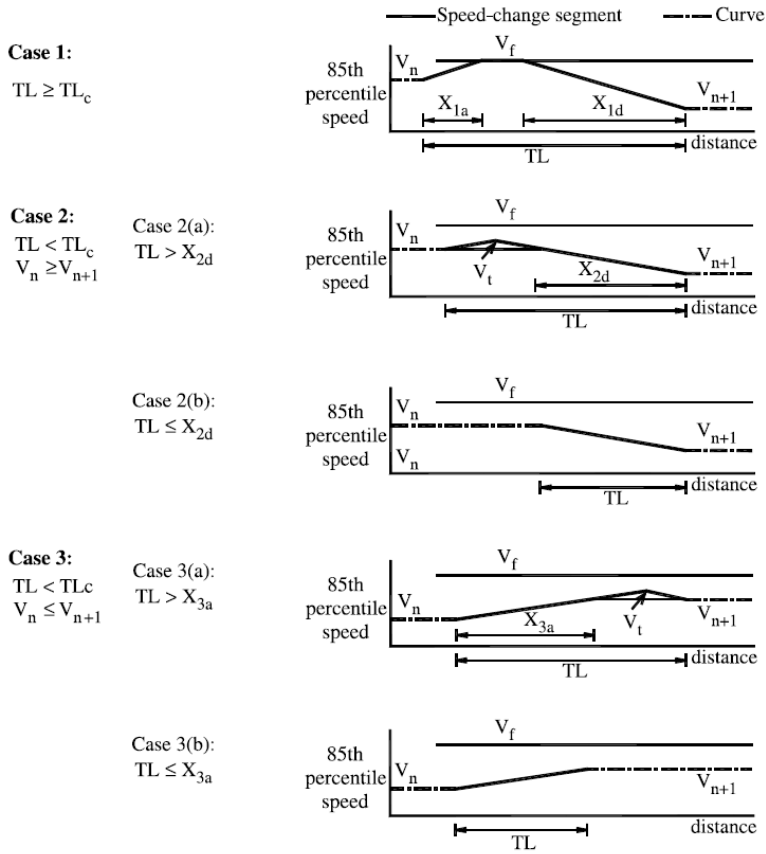


Figura 3.18 Casuística del modelo de perfil de Easa (2003)

Para el caso 2a, la máxima velocidad alcanzada viene dada por la ecuación 40.

$$v_t = \left\{ v_n^2 + 25.92 \cdot \left[\frac{a \cdot d}{a + d} \right] \cdot (TL - X_{2d}) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

Donde:

a : Tasa de aceleración.

d : Tasa de deceleración.

En el caso de asumir las tasas de deceleración y de aceleración de Lamm (1988), el incremento de velocidad alcanzado para el caso 2a es el definido por la ecuación 41.

$$\Delta v_a = \frac{\left\{ -2 \cdot v_n + [4 \cdot v_n^2 + 44.06 \cdot (TL - X_{2d})]^{\frac{1}{2}} \right\}}{2} \quad (41)$$

Expresión que coincide con la proporcionada por Fitzpatrick y Collins (2000) en su modelo.

Las ecuaciones desarrolladas para determinar las distancias de deceleración y aceleración son, particularizadas para este modelo, las que se muestran en la tabla 3.20.

Case	Condition	Subcondition	Equations
Case 1	$TL \geq TL_c$		$X_{1a} = (V_f^2 - V_n^2)/25.92a$ $X_{1d} = (V_f^2 - V_{n+1}^2)/25.92d$ $TL_c = X_{1a} + X_{1d}$
Case 2	$TL < TL_c$ $V_n \geq V_{n+1}$		
Case 2(a)		$TL > X_{2d}$	$X_{2d} = (V_n^2 - V_{n+1}^2)/25.92d$ $V_t = \{V_n^2 + 25.92 [ad/(a + d)] (TL - X_{2d})\}^{1/2}$
Case 2(b)		$TL \leq X_{2d}$	$d' = (V_n^2 - V_{n+1}^2)/(25.92 TL)$ for $TL < X_{2d}$
Case 3	$TL < TL_c$ $V_n \leq V_{n+1}$		
Case 3(a)		$TL > X_{3a}$	$X_{3a} = (V_{n+1}^2 - V_n^2)/25.92a$ $V_t = \{V_{n+1}^2 + 25.92 [ad/(a + d)] (TL - X_{3a})\}^{1/2}$
Case 3(b)		$TL \leq X_{3a}$	$V_{n+1}^a = [V_n^2 + 25.92a(TL)]^{1/2}$ for $TL < X_{3a}$

Tabla 3.20 Variables para el cálculo del modelo de Easa (2003)

Son las mismas que las del modelo de Fitzpatrick y Collins (2000), pero particularizadas para estos casos.

Para el caso 3a, la máxima velocidad conseguida se obtiene con la ecuación 42.

$$v_t = \left\{ v_{n+1}^2 + 25.92 \cdot \left[\frac{a \cdot d}{a + d} \right] \cdot (TL - X_{3a}) \right\}^{1/2} \quad (42)$$

Al igual que ya se comentó en el modelo de Fitzpatrick, en el caso 2b la tasa de deceleración es mayor que los valores estimados por el modelo de Fitzpatrick para tasas de deceleración y aceleración. Se dijo en su momento que el que estos valores fueran mayores no ocasionaba problemas importantes, ya que la suposición de situar las aceleraciones y deceleraciones totalmente en las rectas era una simplificación que provocaría en ocasiones este problema.

En este modelo, la deceleración d es la deceleración necesaria para ajustar la velocidad desde la curva anterior a la siguiente. Por estar en este caso, siempre será mayor que el valor máximo proporcionado por las tasas de Fitzpatrick. Sin embargo, se debe controlar que dicho valor esté siempre por debajo del límite considerado crítico de 2.00 m/s².

De igual modo, en el caso inverso (aceleración), la velocidad en la curva posterior será normalmente inferior a la velocidad de operación convencional, ya que el comportamiento de los conductores en condiciones normales no será el de aumentar su tasa de aceleración para ajustarse a la velocidad de operación de la segunda curva en condiciones normales.

Modelado de la obstrucción de la visibilidad

El modelo introducido hasta ahora es prácticamente idéntico (salvo pequeñas modificaciones) al de Fitzpatrick. La ventaja esencial de este modelo de perfil es que permite modelar la falta de visibilidad en determinadas combinaciones.

De este modo, se presenta a continuación la corrección que permite dicha habilidad. Para modelar la falta de visibilidad en determinados puntos, el primer paso será calcular la visibilidad necesaria. Se define en este modelo *distancia de visibilidad disponible* como la distancia desde la cual el conductor ve por primera vez la curva limitante de velocidad, consecuencia de la obstrucción impuesta por el acuerdo cóncavo o convexo.

Obstrucción en un acuerdo convexo

La distancia de visibilidad disponible será la distancia desde la cual se ve por primera vez el punto PC₂ (ver figura 3.19).

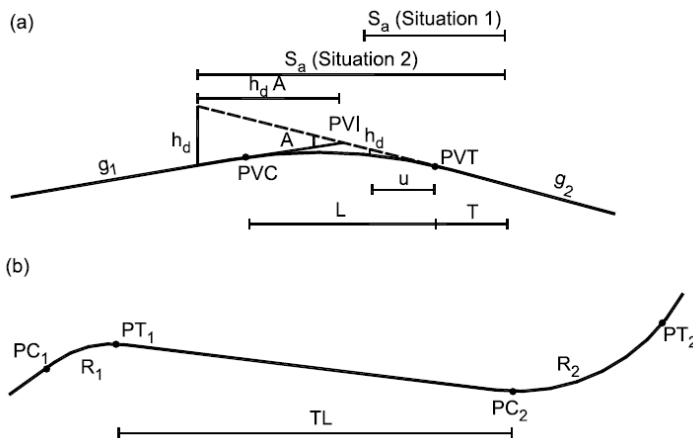


Figura 3.19 Geometría de una obstrucción visual en un acuerdo convexo y en una curva

Existen dos posibilidades: el conductor se encuentra sobre el acuerdo vertical o sobre la recta anterior.

Caso 1: sobre el acuerdo.

En este caso, la distancia de visibilidad disponible es la obtenida por la ecuación 43.

$$S_a = T + u \tag{43}$$

Donde:

T = Porción de recta tras el punto de tangencia final del acuerdo (m).

u = Distancia desde el conductor hasta el punto final del acuerdo (m).

La distancia u se determina con la ecuación 44.

$$u = \left(2 \cdot \frac{h_d}{r}\right)^{0.5}$$

$$r = \frac{1}{100 \cdot K}$$

$$K = \frac{L}{A}$$
(44)

Donde:

h_d : Altura de vista del conductor (m) (1.08 m para v. ligeros según la AASHTO).

r : Tasa de cambio de pendiente.

L : Longitud del acuerdo (m).

A : Diferencia algebraica de pendientes (%).

En caso de que u sea mayor que L , se debe acudir al caso 2.

Caso 2: sobre la recta anterior.

En este caso, la distancia de visibilidad disponible se obtiene con la ecuación 45.

$$S_a = T + \frac{L}{2} + \frac{A \cdot h_d}{100}$$
(45)

Obstrucción en un acuerdo cóncavo

Esta obstrucción únicamente se da cuando el vehículo circula bajo un elemento opaco (como un túnel, cartel, etc.) de gálibro C , que le impide la visualización de la siguiente zona de la carretera. Se puede apreciar en el esquema de la figura 3.20.

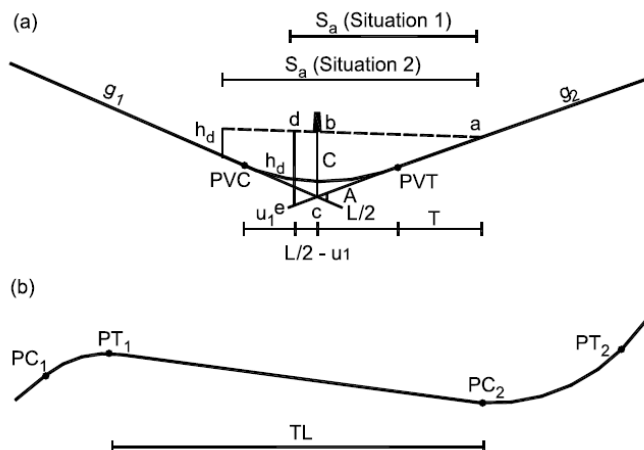


Figura 3.20 Esquema de la obstrucción visual en un acuerdo cóncavo con curva en planta

Para este tipo de obstrucción, los vehículos pesados son más críticos que los ligeros, y por ello el valor de h_d debe ajustarse para estos.

De igual modo que en el caso anterior, se distinguen dos situaciones para determinar la distancia de visibilidad disponible:

Caso 1: sobre el acuerdo.

La distancia de visibilidad viene proporcionada por la función de la ecuación 46.

$$\begin{aligned}
 S_a &= T + L - u_1 \\
 u_1 &= \frac{\left[-b \pm (b_2^2 - 4 \cdot b_1 \cdot b_3)^{\frac{1}{2}} \right]}{2 \cdot b_1} \\
 b_1 &= \frac{\left[\left(\frac{L}{2} + T \right) \cdot r \right]}{2} \\
 b_2 &= C + \frac{L^2 \cdot r}{8} - \left(\frac{L}{2} + T \right) \cdot \frac{A}{100} \\
 b_3 &= - \left[C + \frac{L^2 \cdot r}{8} \right] \cdot (L + T) + \left(\frac{L}{2} + T \right) \cdot \left(h_d + A \cdot \frac{L}{200} \right)
 \end{aligned} \tag{46}$$

Donde:

u_1 : Distancia desde el comienzo del acuerdo hasta el vehículo (m).

De la ecuación cuadrática, únicamente una solución será válida. En caso de que ambas soluciones sean negativas, será porque el conductor se encuentra en la recta previa (caso 2).

Caso 2: sobre la recta previa.

La distancia de visibilidad disponible para la altura del ojo humano y altura del objeto (h_0) viene determinada, según la AASHTO, por la ecuación 47.

$$L = 2 \cdot S_a - 800 \cdot \frac{\left[C - \frac{h_d + h_0}{2} \right]}{A} \tag{47}$$

En este caso, S_a puede determinarse siguiendo la ecuación 48.

$$S_a = \frac{L}{2} + \frac{200}{A} \cdot (2 \cdot C - h_d) \tag{48}$$

El modelo puede complicarse más si se considera que habrá dos bordes del túnel: el anterior y el posterior. Puesto que las diferencias serán mínimas, se recomienda emplear como único valor el gálibo sobre el vértice del acuerdo.

Modelo revisado

Una vez modelada la visibilidad disponible, se procede a determinar si esta es mayor o menor que la visibilidad necesaria. En el caso de que sea mayor, no habrá problemas de visibilidad. En caso contrario, sí los habrá, y el modelo de perfil deberá recoger los cambios necesarios para modelar este efecto.

Para ello, el primer paso es modelar la distancia de visibilidad necesaria (distancia de percepción y reacción). Esta distancia de percepción y reacción se modela según la ecuación 49.

$$D_{pr} = 0.278 \cdot v \cdot t \quad (49)$$

Donde:

v : Velocidad del vehículo en el momento de divisar el comienzo de la curva limitante (km/h).

t : Tiempo de percepción y reacción (s). Asumido en 2.5 s.

El funcionamiento del modelo de perfil de velocidad revisado se basa en la comparación de la distancia requerida con la distancia disponible, obtenidas a partir de la velocidad de operación.

La distancia de deceleración requerida se calcula con el modelo inicial (sin considerar las discontinuidades de visibilidad), con la ecuación 50.

$$D_r = \frac{v_0^2 - v_{n+1}^2}{25.92 \cdot d} \quad (50)$$

Donde:

v_0 : Velocidad inicial (km/h).

La distancia de deceleración disponible viene dada por la ecuación 51.

$$D_a = S_a - 0.278 \cdot v \cdot t \quad (51)$$

Los perfiles de velocidad locales para el modelo extendido son los que se muestran en la figura 3.21.

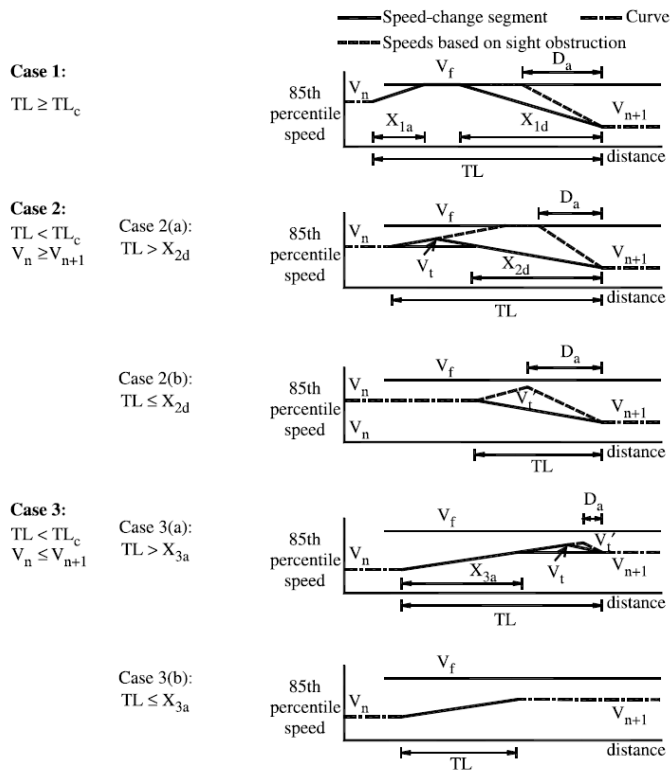


Figura 3.21 Modelos de perfil para el modelo revisado considerando la obstrucción visual
 A continuación se comentan los tres posibles casos:

Caso 1:

La distancia disponible para decelerar se calcula con la velocidad deseada (que es la que se tiene en el momento de aproximarse a la siguiente curva).

Si esta distancia de deceleración es igual o superior que la requerida, se aplica el modelo no extendido (ya que la curva será visible cuando la distancia de visibilidad es grande). En el caso contrario, el perfil de velocidad se debe modificar basado en la obstrucción. La nueva tasa de deceleración se obtiene con la ecuación 52.

$$d' = \frac{v_f^2 - v_{n+1}^2}{25.92 \cdot D_a} \tag{51}$$

Caso 2:

En este caso el conductor tenderá a acelerar hasta que vea la obstrucción o hasta alcanzar la velocidad deseada. Puesto que las velocidades en este caso son mayores que en el caso normal, las tasas de deceleración empleadas tras haber divisado la curva serán más altas de lo normal.

La nueva velocidad máxima viene dada por la ecuación 52.

$$v'_t = [v_n^2 + 25.92 \cdot a \cdot (TL - S_a)]^{\frac{1}{2}} \quad (52)$$

En caso de que esta velocidad sea mayor que la deseada, se sustituirá por la segunda, resultando un perfil de velocidades similar al del caso 1. En caso de que no se llegue a alcanzar la velocidad deseada, resultará similar al caso 2 del modelo sin extender. En este caso la nueva tasa de deceleración se obtiene con la ecuación 53.

$$d' = \frac{v_t'^2 - v_{n+1}^2}{25.92 \cdot D_a} \quad (53)$$

Estos cálculos son válidos tanto para el caso 2a como para el 2b.

Caso 3:

En este caso, únicamente el caso 3a está afectado por la obstrucción. Este caso es idéntico al 2, pero únicamente la situación en la que no se alcanza la velocidad deseada.

3.5.5.6. Modelo de Crisman et al. (2005)

Se deben construir dos perfiles de velocidad: uno para el sentido creciente y otro para el decreciente, ya que las velocidades en las rectas y las tasas de deceleración y aceleración son diferentes.

Este modelo de perfil de velocidad, así como los modelos discretos aplicados en el mismo presentan una validez para pendientes longitudinales máximas de 3 %.

El procedimiento para constituir perfiles de velocidad siguiendo este modelo es el siguiente:

- División de la carretera en tramos homogéneos de acuerdo con el método alemán (división de la vía en tramos de comportamiento similar de CCR).
- Cálculo de la CCR para cada tramo homogéneo y obtención del ancho de la vía y de la velocidad deseada del tramo.
- Obtención de las velocidades en las curvas.
- Obtención de las velocidades en las rectas (incluyendo las curvas de transición y las curvas circulares con radios superiores a 2200 m).
- Ajuste del modelo, situando los incrementos de velocidad en los tramos rectos.

3.5.5.7. Modelo de Polus (2004)

Modelo desarrollado para el ajuste de los perfiles de velocidad sobre los que posteriormente analiza la consistencia.

La confección de este modelo se basa en el análisis por separado de cada una de los elementos geométricos y la obtención de sus velocidades de operación con modelos discretos.

Para las curvas horizontales el modelo escogido es el de Krammes (1995). El modelo para la estimación de las velocidades de operación en rectas es el de Polus, et al. (2000).

Una vez determinadas todas las velocidades de cada elemento geométrico se confecciona el perfil de velocidad aplicando unos tiempos de deceleración y aceleración especificados. En el caso de aceleración, se supone que el tiempo empleado para cambiar de velocidad es de 4 segundos, mientras que en la deceleración se emplea un tiempo de 3 segundos. En ambos casos el reparto de estos tiempos es de 1 segundo en la curva y el resto en la recta.

Posteriormente, Polus (2005) desarrolló más el modelo de perfil de velocidad incorporando el efecto de la pendiente vertical. Este cálculo se empleó para conocer la velocidad de operación de los vehículos pesados. La velocidad de operación estimada para la alineación en alzado se obtuvo empleando las curvas de velocidad de la AASHTO.

3.5.5.8. Modelo de Dell'Acqua y Russo (2010)

Dell'Acqua y Russo llevaron a cabo un análisis experimental en carreteras de bajo volumen de tráfico sin curvas de transición en el sur de Italia. Este estudio presentó una metodología para evaluar los ratios de deceleración y aceleración que posteriormente utilizaron para desarrollar cuatro ecuaciones para la estimación de velocidades en rectas y curvas. El objetivo de esta investigación fue dibujar perfiles continuos de velocidad que muestren el comportamiento completo de la velocidad desarrollada por los conductores e individualizar las secciones críticas de la carretera para mejorar la seguridad vial.

Para la calibración de los modelos se basaron en la siguiente cantidad de datos:

- 140 lugares para estudiar las velocidades en rectas, incluyendo curvas con radio mayor de 500 m.
- 100 lugares para calibrar el modelo de estimación de velocidades en curvas con radio inferior a 500 m.
- 70 transiciones recta-curva-recta se utilizaron para el estudio de la deceleración y aceleración.
- En cada sitio se tomaron al menos 100 valores.

Tras el estudio de las tasas de deceleración y aceleración y de las longitudes en las que se llevan a cabo, junto con el desarrollo de dos modelos para la predicción de la velocidad en rectas (longitud mayor o menor de 500 m) y dos modelos para la predicción de la velocidad en curvas horizontales (con *CCR* menor o mayor de 240 gon/km), establecieron una metodología con el fin de utilizar estos conceptos para el trazado de un perfil de velocidades continuo en un tramo de carretera.

3.5.6. Modelos avanzados

Con el avance de la informática y de las nuevas tecnologías, se ha conseguido aumentar la capacidad de procesamiento de datos, con lo que esta segregación de una vía en sus diferentes elementos no se hace tan necesaria como antes,

consiguiéndose desarrollar perfiles de velocidad de operación íntegros para un determinado tramo de vía. No obstante, es interesante conocer el comportamiento de cada uno de los elementos de la vía por separado, por lo que el interés por los modelos discretos sigue estando vigente.

Dentro de los modelos y aplicaciones avanzadas existen principalmente dos aplicaciones: modelos de perfil de velocidad basados en algoritmos genéticos y redes neuronales; y aplicaciones de los modelos de perfil de velocidad para su implementación en aplicaciones informáticas de diseño de vías, como el IHSDM.

3.5.6.1. Modelos mediante redes neuronales

Los modelos de perfiles de velocidad anteriormente desarrollados están basados en aproximaciones empleando la regresión lineal. Ello conlleva el considerar un conjunto limitado de variables y actuando siguiendo un esquema fijo: la suma de coeficientes multiplicados por la variable introducida. Es por ello que los resultados obtenidos dependerán fundamentalmente de las variables escogidas y de la forma en que se integran en el modelo.

Las redes neuronales (ANN) son herramientas de modelación que no imponen las anteriores limitaciones y condiciones.

Las redes neuronales permiten el introducir una serie de variables iniciales, a partir de las cuales el algoritmo obtiene diferentes familias de posibles combinaciones entre ellas, ofreciendo finalmente el ajuste de mejor aproximación a los datos iniciales. El esquema de funcionamiento para estimar las velocidades de operación en curvas, por ejemplo, es el que se muestra en la figura 3.21.

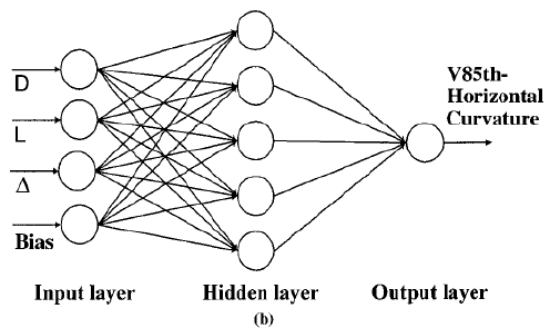


Figura 3.22 Esquema del funcionamiento de las redes neuronales

Se han realizado diferentes aproximaciones a este método de estimación de la velocidad de operación, obteniendo resultados comparables perfectamente con los modelos de regresión.

3.5.6.2. Aplicación al IHSDM

El IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model) es una aplicación informática orientada a proporcionar un método de diseño de carreteras seguras, basado en el adecuado cumplimiento de la normativa de diseño de vías y un resultado

consistente. Para evaluar la consistencia se emplean los criterios I y II de Lamm, por lo que es necesario determinar las velocidades de percentil 85.

Esta determinación de las velocidades de operación se lleva a cabo mediante el segundo módulo de dicho modelo de diseño.

El procedimiento empleado para obtener el perfil de velocidad de operación se muestra en la figura 3.23.

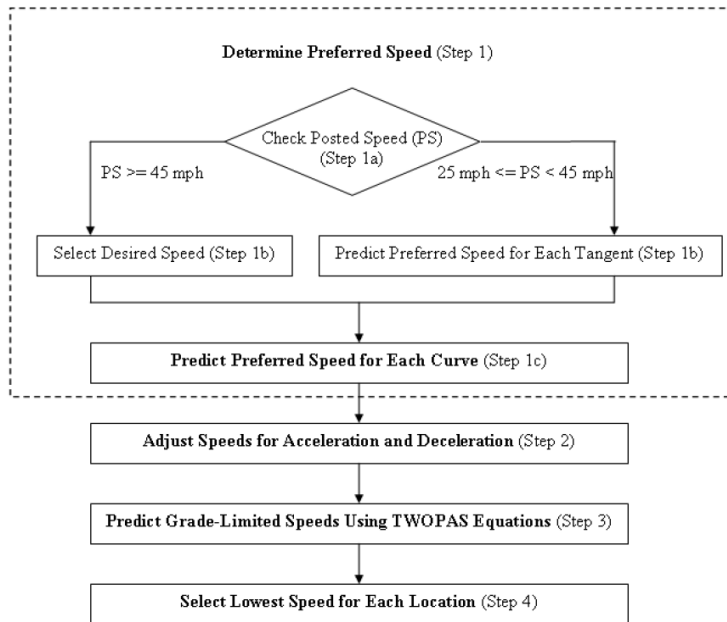


Figura 3.23 Diagrama de flujo para la construcción del perfil de velocidad de operación en el IHSDM

Como puede observarse, el procedimiento divide las carreteras en dos grupos, dependiendo de si la velocidad límite es superior o igual a 45 mph (72.42 km/h) o si la velocidad límite se encuentra entre 25 y 45 mph (40.23 y 72.42 km/h), dándoles la denominación de carreteras de alta velocidad y carreteras de baja velocidad, respectivamente.

Para carreteras de velocidad alta, en las rectas se selecciona la velocidad deseada en rectas, dando como valor por defecto 100 km/h.

En carreteras de baja velocidad se predice la velocidad preferida para cada recta, utilizando ecuaciones para su estimación basadas en datos empíricos tomados en tramos rectos de Estados Unidos. Para rectas menores de 150 ft de longitud (45.72 m), la velocidad de las rectas es función de la velocidad límite y del radio de la curva anterior. Para rectas de 150 ft o más, la velocidad en las rectas es función de la velocidad límite, de la tasa de peligrosidad de las zonas adyacentes a la vía y la longitud de la recta. Los modelos pueden verse en las tablas 3.21 y 3.22.

El siguiente paso es la estimación de las velocidades en curvas, mediante modelos basados en datos de velocidad tomados en carreteras de Estados Unidos. En ambos tipos de carreteras se asume la hipótesis de que la velocidad permanece constante a lo largo de toda la curva.

En las carreteras de alta velocidad, la velocidad de la curva es función del radio de la curva y depende del trazado en alzado.

Equation #	Alignment Type/Condition	Preferred Speed *
	Tangent	Desired Speed
1.	Horizontal Curve on Grade: $G < -4\%$	$V_{85} = 102.10 - \frac{3077.13}{R}$
2.	Horizontal Curve on Grade: $-4\% \leq G < 0\%$	$V_{85} = 105.98 - \frac{3709.90}{R}$
3.	Horizontal Curve on Grade: $0\% \leq G < 4\%$	$V_{85} = 104.82 - \frac{3574.51}{R}$
4.	Horizontal Curve on Grade: $G \geq 4\%$	$V_{85} = 96.61 - \frac{2752.19}{R}$
5A.	Horizontal Curve and Vertical Curve Combined: Vertical curve begins before midpoint of horizontal curve.	Calculate "effective grade" and use appropriate equation 1-4
5B.	Horizontal Curve and Vertical Curve Combined: Vertical curve begins after midpoint of horizontal curve.	Use equation 1-4 based on entry grade
* Preferred speed for High Speed model would have a minimum of 60 km/h (37.28 mph).		

Tabla 3.21 Ecuaciones para la estimación de la velocidad de operación en carreteras de alta velocidad utilizadas en el IHSDM

Para carreteras de baja velocidad, la velocidad en curvas es función del radio de la curva. La tabla 3.22 muestra los modelos para la estimación de las velocidades en este tipo de carreteras, en unidades del sistema métrico.

Alignment Type/ Condition	Preferred Speed
Short Tangent ($L_T < 45.72^m$)	<p>Maximum of</p> $V_{T85} = 56.57 + 0.26PS - \frac{555}{R_{preceeding}} \quad (1) \text{ and}$ <p>Minimum of</p> $V_{C85} = 71.21 - \frac{717}{R} \quad (2) \text{ and}$ <p>CS_{UB}</p>
Long Tangent ($L_T \geq 45.72^m$)	<p>Maximum of</p> $V_{T85} = 41.91 + 0.53PS - 1.43RHR + 0.0264L_T \quad (3) \text{ and}$ <p>Minimum of</p> $V_{C85} = 71.21 - \frac{717}{R} \quad (4) \text{ and}$ <p>CS_{UB}</p>
Horizontal Curve	<p>Minimum of</p> $V_{C85} = 71.21 - \frac{717}{R} \quad (5) \text{ and}$ <p>CS_{UB}</p>
<p>Where: V_{T85} = 85th percentile speed on tangent (km/h) L_T = Length of tangent (m) PS = Posted Speed (km/h) $R_{preceeding}$ = Radius of the preceding curve (m). If the Radius is less than 15^m, 15^m would be used in the calculations. RHR = Roadside Hazard Rating V_{C85} = 85th percentile speed on curve (km/h) R = Radius of the curve (m). If the Radius is less than 15^m, 15^m would be used in the calculations. CS_{UB} = Curve Speed Upper Bound as a function of the posted speed (Posted Speed plus 16.093 Km/h)</p>	

Tabla 3.22 Ecuaciones para la estimación de la velocidad de operación en carreteras de baja velocidad utilizadas en el IHSDM

A continuación, se completa el perfil con las tasas de deceleración y aceleración que aparecen en la tabla 3.23, realizando siempre el cambio de velocidad en el tramo recto.

	Condition	Curve radius (R) (m)	Rates (m/s ²)
Deceleration	Tangent-to-Curve	$R^* > 873$	0.05
		$175 \leq R^* \leq 873$	$-0.0008726 + 37430/R^2$
		$R^* < 175$	1.25
	Curve-to-Tangent, or Tangent-to-Tangent	All	0.05
	To a STOP condition		2.5
	To an end speed (> 0 km/h)		1.25
Acceleration	Curve-to-Tangent	$R^{**} > 436$	0.21
		$250 \leq R^{**} \leq 436$	0.43
		$R^{**} < 250$	0.54
	Tangent-to-Curve, or Tangent-to-Tangent	All	0.21
	From a STOP condition		1.54
	From a start speed (> 0 km/h)		0.54

* For tangent-to-curve deceleration, the radius of the curve following the tangent is used.

**For curve-to-tangent acceleration, the radius of the curve preceding the tangent is used.

Tabla 3.23 Ecuaciones para la estimación de las tasas de deceleración y aceleración utilizadas en el IHSDM

Hasta este paso se ha obtenido el perfil estimado de velocidad de operación, como se muestra en la figura 3.24.

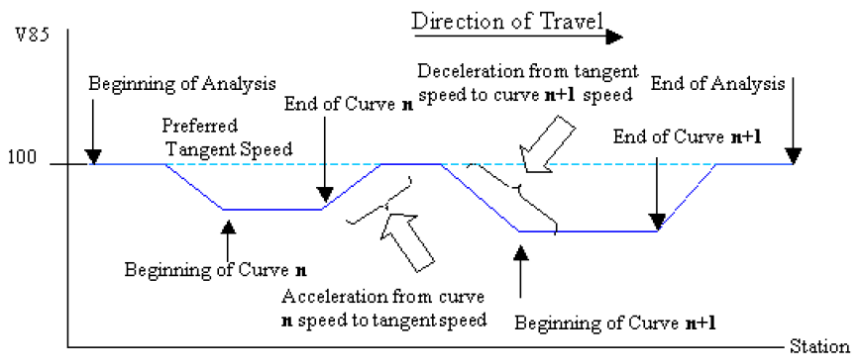


Figura 3.24 Ejemplo de construcción de un perfil estimado de velocidad de operación

La distancia disponible para deceleración/aceleración entre curvas (la longitud de la recta intermedia) se compara con la longitud necesaria para la aceleración desde la velocidad estimada en la curva n a la velocidad de la recta más la longitud de deceleración necesaria desde la velocidad en recta a la velocidad estimada en la curva n+1. La longitud de recta disponible versus la longitud de deceleración/aceleración necesaria, junto con la velocidad estimada en la curva n versus la velocidad estimada en la curva n+1, determina la condición de deceleración/aceleración para una sección curva-recta-curva dada. Las tasas de deceleración/aceleración están basadas en el radio de la curva. Para una

combinación curva-recta-curva, la aceleración es función del radio de la primera curva (curva n), mientras que la deceleración es función del radio de la segunda curva (curva $n+1$). Si la recta no es suficientemente larga, la velocidad puede no alcanzar la velocidad estimada para la recta.

Hasta este momento, el modelo únicamente ha tenido en cuenta el trazado en planta. Para la consideración del trazado en alzado se utilizan las ecuaciones TWOPAS. Con estas ecuaciones se estiman las velocidades limitadas por las pendientes. De esta forma, se genera un segundo perfil de velocidades, basado en el trazado en alzado.

Una vez obtenidos los dos perfiles de velocidades, se comparan las velocidades de los dos perfiles cada punto y se selecciona para cada punto la menor de las dos. Así, se compone el perfil de velocidades final.

En la utilización de esta aplicación, hay que tener en cuenta que las curvas de transición (clotoides) son consideradas como parte de las rectas. Además, en las combinaciones curva-curva, la forma de proceder es estimar la velocidad para cada una de ellas, según los modelos correspondientes, mostrando el perfil de velocidades un salto instantáneo de velocidades entre las dos curvas.

Como resalta Rocci (2011), el principal inconveniente de la aplicación del IHSDM al estudio de la consistencia del trazado en las carreteras españolas estriba en la utilización de modelos de perfiles de velocidades calibrados para las condiciones de circulación estadounidenses.

Dominguez-Lira et al. (2010) presentaron la adaptación y calibración del IHSDM para la evaluación de la seguridad de los proyectos de carreteras realizados en España. Sin embargo, no modificaron el módulo la consistencia del diseño basado en modelos de velocidad de operación no calibrados en carreteras españolas.

Finalmente, cabe destacar el sistema automatizado basado en GIS para la estimación de la velocidad y la evaluación de la seguridad de la carretera desarrollado por Castro et al. (2008). En él, el modelo para la estimación de la velocidad de operación, las tasas de deceleración/aceleración y otras características pueden ser configurados por el usuario, con el fin de obtener un análisis más representativo de los conductores y las condiciones locales de las carreteras estudiadas.

3.6. EVALUACIÓN DE LOS ESTUDIOS ANALIZADOS

3.6.1. Evaluación de los métodos utilizados en la restitución de la geometría

La utilización de imágenes de satélite de alta resolución para la restitución de la geometría de la vía ha presentado, según los trabajos citados en el apartado correspondiente, resultados altamente satisfactorios. Sin embargo, la necesidad de adquirir las citadas imágenes cada vez que se precisa la restitución de la geometría de una vía diferente puede suponer un alto coste. Además, el procedimiento descrito

en dichos estudios para el tratamiento de las imágenes implica un elevado coste de personal especializado.

Por otra parte, las metodologías basadas en la utilización de GPSs de alta precisión también han dado como resultado muy buenas aproximaciones a la geometría de la vía. De hecho, las diferencias observadas con la geometría real de la carretera, aunque dependiendo de la cadencia de toma de datos del dispositivo, han sido relativamente asumibles. En la evaluación de esta metodología es importante tener en cuenta que el número de trazadas realizadas en los estudios citados ha sido reducida, 3 recorridos por sentido en el mejor de los casos. Por lo que los resultados podrían mejorarse aumentando el número de trayectorias y, por tanto, disponiendo de más puntos intermedios.

A pesar de los buenos resultados presentados en la restitución de la geometría de la vía, las citadas metodologías no son aplicables en la estimación de velocidades desarrolladas. En el caso de la utilización de imágenes de alta resolución la razón es obvia al tratarse de imágenes estáticas, mientras que en el caso de la utilización de GPS de alta precisión la razón reside en que este procedimiento implica la utilización de un vehículo especialmente equipado para la toma de datos con lo que no se obtiene una muestra significativa para el estudio de las velocidades.

3.6.2. Evaluación de los estudios relacionados con el factor humano y el vehículo

En gran parte de las investigaciones realizadas con el objetivo de caracterizar el comportamiento de los conductores y sus actitudes frente a la tarea de la conducción, se basan únicamente en autoinformes y cuestionarios.

A pesar de que gracias a los autoinformes se puede alcanzar una gran muestra, permitiendo así la generalización a toda la población, esta metodología presenta ciertos inconvenientes. Su principal limitación es que la metodología consiste en el estudio de informes subjetivos de los participantes sobre su propio comportamiento. Esto conlleva errores como respuestas sesgadas por aceptación social, no entendimiento de preguntas, opciones de respuesta inadecuadas, la diferencia entre intención y comportamiento, etc.

Otra metodología consiste en el análisis de encuestas escritas complementadas con fotografías y videos que se utilizan usualmente para la obtención de información de las actitudes y preferencias de los conductores sobre situaciones o condiciones específicas de las carreteras. Estas encuestas tienen la ventaja de proporcionar a los sujetos información adicional sobre la carretera y la conducción.

Otros estudios, basan el estudio del comportamiento de los conductores y los estilos de conducción en la evaluación de la influencia de distintos factores en la velocidad desarrollada. Para ello, la velocidad suele medirse por radar. Sin embargo, para la toma de datos de los factores relacionados con el conductor hay varias alternativas:

- La caracterización de las variables relacionadas con el conductor, como la edad o la experiencia en la conducción, a partir de fotografías de los conductores durante la circulación a lo largo del tramo en el que se están

midiendo las velocidades. Dependiendo de la precisión de las fotografías, este método puede llevar a grandes errores. Además, la información tomada es limitada.

- El registro de la matrícula y la obtención de datos relacionados con el conductor y el vehículo a partir de las bases de datos de las administraciones competentes. Este método puede dar lugar a datos erróneos debido a que la persona que conduce no tiene por qué ser el propietario del vehículo que consta en las bases de datos asociado a esa matrícula. Sin embargo, este es un buen método para la obtención de datos relacionados con el vehículo. El principal inconveniente es la dificultad para la obtención de esos datos.
- Entrevista con los conductores después de haber registrado sus datos de velocidad. Es de los mejores métodos ya que así no se sienten influenciados por la toma de datos. No obstante, ante ciertas preguntas como el historial de accidentes o de sanciones, la verosimilitud de las respuestas puede quedar en entredicho por los mismos motivos que los citados para los autoinformes.
- Entrevista previa a la toma de datos de velocidad. No es muy recomendable, especialmente cuando algunas de las preguntas están relacionadas con el número de accidentes en los que el conductor ha estado implicado y el número de sanciones recibidas. Estas preguntas pueden hacer desconfiar al conductor que puede variar su comportamiento durante la conducción en el tramo de estudio, consciente o inconscientemente.

3.6.3. Deficiencias de los modelos de estimación de velocidad de operación en función de la geometría

Tras analizar los distintos modelos presentes en la literatura, se presenta a continuación un resumen de las principales deficiencias encontradas en ellos y que en general ya han sido identificadas por Hassan et al. (2011). Dichas deficiencias pueden abarcar desde la metodología utilizada en la toma de datos hasta las hipótesis en las que se basan los modelos y que, en muchos casos, no se corresponden con el comportamiento real de los conductores, incluyendo otros aspectos que a continuación se detallan.

3.6.3.1. Deficiencias relacionadas con la toma de datos

Los tramos de estudio

En general, para la obtención de datos destinados a la calibración de modelos de estimación de la velocidad en curvas horizontales se han escogido tramos de carretera, excluyendo generalmente algunas condiciones desfavorables como la presencia de intersecciones o cambios en el número de carriles. Además, la mayoría de los estudios no consideran las curvas de transición.

Debido a este proceso de simplificación, la aplicabilidad de los modelos es limitada.

Tamaño de muestra o número de observaciones

El tamaño de la muestra utilizado en el desarrollo de modelos en cuanto a número de observaciones por tramo es un aspecto importante al examinar la validez de un modelo de velocidad de operación. Esta información no está presente en cerca de la mitad de los modelos existentes y, en el resto, el número de las observaciones para cada sección varía entre 30 y 100. La fiabilidad de que una muestra tan pequeña pueda representar adecuadamente el percentil 85 de la velocidad en un tramo puede ser cuestionable.

Por otra parte, también es reducido el número de tramos, bien sea recta, curva o transición, que se utiliza para la calibración de la mayoría de los modelos. Hay que tener en cuenta que la ausencia de datos para un cierto rango de la variable independiente, como puede ser para un valor del radio, produce un falso aumento del R^2 .

Errores debidos a la metodología de toma de datos

Como se ha comentado en el apartado correspondiente, durante la revisión de los modelos existentes de la velocidad se han detectado distintas metodologías para la toma de datos. La mayor parte de los modelos toman datos puntuales de velocidad mediante una pistola radar. Estas 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.

Pocos estudios han analizado la influencia de estos errores en los datos finales obtenidos. En algunos de ellos se limitan a citar que durante la toma de datos se realizó un gran esfuerzo para ocultar a los observadores pero no se especifica como de ocultos estaban. Además, intentar ocultar a los observadores conlleva alejarlos de la carretera, con lo que se aumentan otros errores como el error de coseno en las pistolas radar. 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. Sin embargo, aunque los errores se minimizan con estos dispositivos, se sigue obteniendo como único resultado datos puntuales de velocidades en determinadas ubicaciones.

Para obtener datos continuos de velocidad, algunas investigaciones han utilizado la grabación y posterior tratamiento de videos, sin embargo con esta metodología únicamente se pueden obtener datos en un corto tramo de la carretera.

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 vehículos instrumentados equipados con GPS o en simuladores de conducción. En ambas metodologías se utilizaron, como conductores, voluntarios conocedores de los fines

de la investigación con lo que su comportamiento no se corresponde con el comportamiento real de los conductores que circulan por la carretera a estudiar.

Además, la utilización de un vehículo instrumentado extraño a los conductores puede suponer un desarrollo más limitado de las velocidades por falta de familiarización con los mandos y las respuestas del vehículo. En el caso de los simuladores de conducción esta diferencia en el comportamiento se acentúa al tratarse de una simulación y no de una carretera real.

Hay otros aspectos que pueden influir en la velocidad escogida por los conductores y que en la mayoría de los estudios no se tienen en cuenta. Estos factores son los relacionados con la longitud y la urgencia del viaje o la familiaridad que el conductor tenga con ese trazado y el nivel de control de la velocidad en ese tramo.

Localización de las medidas de velocidad

Generalmente la toma de datos para la calibración de modelos que estimen la velocidad en curvas se realiza en el punto medio, suponiendo que en él se produce la velocidad mínima. Sin embargo, esta hipótesis no se ha comprobado.

Del mismo modo, la toma de velocidades en la recta se realiza en un punto de la misma donde se supone que se alcanza la velocidad máxima sin influencia de las curvas adyacente, pero de nuevo no se comprueba.

Finalmente, en el caso de la toma de datos para el estudio de la deceleración y de la aceleración en las zonas de transición recta-curva-recta, se suelen tomar datos en distintos puntos. Generalmente estos puntos se sitúan del siguiente modo: uno de ellos aproximadamente a 200 m del inicio de la curva para tomar la velocidad en la recta, uno en cada extremo de la curva, uno en el punto medio de la curva y un aproximadamente a 200 m del final de la curva.

De esta forma se intenta captar el proceso de deceleración y aceleración, sin embargo sólo se obtiene una aproximación pues ninguno de esos datos se corresponde con el inicio o con el final de la deceleración/aceleración, así como tampoco existe la certeza de que se recojan la velocidad máxima en recta y mínima en curva.

3.6.3.2. Hipótesis no realistas sobre el comportamiento de los conductores

La aceleración y deceleración ocurre únicamente en las rectas

Muchos de los modelos estudiados asumen que la deceleración y la aceleración ocurren únicamente en las rectas, considerando la velocidad constante a lo largo de la curva. Como se ha comprobado en los estudios más recientes esto no es lo que realmente ocurre. De hecho, distintos datos de campo obtenidos por algunos investigadores sugieren que los conductores probablemente ajustan su velocidad dentro de los límites de la sección curva, especialmente en las curvas de transición.

La deceleración y aceleración considerando el perfil longitudinal o la combinación vertical/horizontal es la misma que considerando sólo la alineación horizontal

La mayoría de los modelos desarrollados para estimar las tasas de deceleración y aceleración se han basado en la toma de datos en curvas horizontales. Por ello, no hay demasiados datos disponibles para predecir las tasas de deceleración y aceleración para perfiles longitudinales o para combinaciones vertical/horizontal. En estos casos se asume el máximo valor seleccionado para las curvas horizontales.

3.6.3.3. Estimación de los cambios de velocidad entre elementos geométricos

La estimación del diferencial de velocidad desde una recta a una curva es prioritaria a la hora de evaluar la consistencia del diseño de una carretera. Hay especialmente tres métodos para la estimación del diferencial de velocidad en los modelos existentes: ΔV_{85} , $\Delta_{85}V$ y *85MSR*.

El método ΔV_{85} se ha utilizado en la mayoría de los modelos existentes, asumiendo que la distribución de velocidades en elementos sucesivos es la misma. Sin embargo, se ha demostrado que las distribuciones de velocidad en las curvas y en las rectas no son las mismas y, por tanto, la simple diferencia entre los valores de la velocidad de operación no se corresponde con la realidad. Además, aunque las distribuciones fueran las mismas, el conductor del percentil 85 no tiene por qué ser el mismo en las dos localizaciones. De hecho, se ha comprobado que el uso del percentil 85 de velocidad para evaluar la consistencia del diseño tiende a subestimar la reducción de la velocidad experimentada por los conductores individuales.

Por ello, se han introducido nuevos parámetros basados en la reducción de la velocidad de los conductores individuales como *85MSR* y $\Delta_{85}V$. El primero de ellos es considerado, en general, como la reducción de velocidad máxima para los conductores individuales basados en datos de nueve puntos distribuidos entre la curva y la recta anterior, mientras que el segundo es el percentil 85 de la reducción de velocidad para los conductores individuales basada en datos de dos puntos en la recta y en el punto medio de la curva. En ambos casos, al tratarse de datos puntuales, no se tiene constancia cierta de que las velocidades utilizadas sean las velocidades desarrolladas por los conductores individuales en el inicio y en el final de su deceleración.

Aunque usar sólo dos puntos de toma de datos para determinar $\Delta_{85}V$ puede ser válido, el punto medio de la recta y el punto medio de la curva pueden no ser las localizaciones adecuadas.

Conclusiones similares pueden extraerse de los métodos utilizados para el análisis de la aceleración basados en datos puntuales. Como en el caso de la deceleración, no puede asegurarse que las velocidades registradas se correspondan con el inicio y final de la transición de velocidad.

3.6.3.4. Falta de uniformidad entre los modelos

En los últimos 50 años, distintos modelos han sido desarrollados para predecir la velocidad de operación en las secciones curvas de las carreteras y, aunque en menor cantidad, también modelos para la predicción de la velocidad de operación en rectas y modelos para estimar el diferencial de velocidad entre elementos

consecutivos. Sin embargo, el formato de los modelos, las variables independientes y los coeficientes de regresión son, en la mayoría de los casos, sustancialmente diferentes de un modelo a otro.

Este hecho puede haber sido el resultado de diferencias en el comportamiento del conductor entre distintas localizaciones, incluso dentro de un mismo país. Por todo ello, parece que un único modelo no puede ser universalmente aceptado.

3.6.3.5. Escasez de modelos con la consideración de los vehículos pesados

La mayoría de los modelos desarrollados hasta la fecha se han basado principalmente en las velocidades de vehículos ligeros, aunque existen algunos estudios en los que ya se han considerado los vehículos pesados.

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 se basan en toma de datos puntuales. Al utilizar estos datos puntuales en el estudio de la velocidad desarrollada por los vehículos pesados hay que tener en cuenta que la mínima velocidad para estos no tiene por qué ocurrir en el mismo lugar que para los vehículos ligeros.

Asimismo, al evaluar los vehículos pesados es importante considerar las implicaciones que tiene la pendiente del perfil longitudinal, que en los vehículos ligeros puede tener menos importancia. Las rampas en el perfil longitudinal tienden a reducir las velocidades en los vehículos pesados más que en los ligeros.

En este sentido, también debe considerarse la posible variación en la evolución de los vehículos pesados debida a la influencia de la carga variable que pueden transportar.

3.6.3.6. Limitaciones de la regresión lineal

La mayoría de los modelos de velocidades de operación utiliza modelos convencionales de regresión lineal. Estos modelos pueden conllevar distintas limitaciones.

Hipótesis defectuosa de independencia de los datos

Algunos estudios han destacado que, aunque los modelos convencionales asumen que las tomas de datos de velocidad en secciones distintas de la carretera son independientes, asumir esto puede causar que la diferencia de velocidades se subestime.

Park y Saccomanno (2006) añadieron que la velocidad de operación de un vehículo individual en una sección aguas abajo (sección curva) puede no ser independiente de su velocidad de operación en la sección de aguas arriba (sección recta). Los datos recopilados desde las dos secciones de la carretera están por tanto interrelacionados.

La hipótesis de que las medidas de velocidad obtenidas desde las secciones aguas arriba y desde las secciones aguas abajo son independientes cuando, en realidad, están interrelacionadas viola una hipótesis estadística clave. La realización de

inferencias estadísticas utilizando datos interrelacionados es conocido como la falacia de pseudo-replicación. La pseudo-replicación puede tener un significado importante, dando unos resultados del estudio infradimensionados o sobredimensionados. En los estudios de la consistencia de la velocidad, la pseudo-replicación ha dado como resultado los modelos subestimados en los que se subestima el diferencial de velocidad de una sección de la carretera a otra.

Pérdida de información debida a la agregación de los datos

Cuando se utiliza la regresión lineal utilizando un estadístico descriptivo como es la V_{85} se reduce la naturaleza de la variabilidad asociada con la función de regresión, así la influencia de los elementos geométricos puede estar sobrevalorada o subvalorada.

Los estudios convencionales han confiado en la información procedente de datos agregados para derivar sus estimaciones de la velocidad media y del percentil 85 de la velocidad en distintas secciones de la carretera, así como de los diferenciales de velocidad. La pérdida de información debida a la agregación de los datos es conocida como la falacia ecológica y, a veces, infla el coeficiente de determinación (R^2), es decir la adecuación del modelo.

Utilización de ecuaciones más allá de sus límites

Se tiene bastantes dudas sobre la validez de los valores estimados cuando la ecuación de regresión se utiliza más allá del rango de los datos recogidos, por lo que sería conveniente limitar el rango de validez de los modelos.

Igualar una ecuación de regresión a otra

Algunos estudios están intentando ver cómo interactúan distintas ecuaciones de regresión que han sido desarrolladas con distintos grupos de datos.

3.6.3.7. Aplicabilidad limitada de los modelos

La mayoría de los modelos se basan en datos tomados bajo unas condiciones específicas y en lugares con unas características determinadas. Todo ello da como resultado que la aplicabilidad de los modelos obtenidos sea limitada.

Combinación del trazado en planta y en alzado

La mayoría de los modelos se basan en el trazado en planta, sin embargo considerar únicamente el efecto bidimensional (2D), en vez del trazado real (3D) puede subestimar o sobrestimar los valores de la velocidad. Este aspecto es especialmente importante al estudiar la velocidad desarrollada por los vehículos pesados.

Escasez de modelos de velocidad en recta

En comparación con el número de modelos para la predicción de velocidad en curva, hay relativamente pocos modelos para la estimación de la velocidad en rectas. Esto es debido a que el número de las variables que influyen en las velocidades de las rectas es mayor que el número de las que influyen en las velocidades en curvas, por

lo que la predicción del percentil 85 de la velocidad en rectas es relativamente compleja.

Mientras que la velocidad en curvas se ha comprobado que depende principalmente de variables como la curvatura, el peralte y los coeficientes de fricción lateral, todos ellos parámetros sobre los que los proyectistas pueden intervenir, la velocidad desarrollada en una recta depende de un amplio rango de características de la carretera, como la longitud del tramo recto, el radio de la curva anterior y posterior, los elementos de la sección transversal, el perfil longitudinal, la orografía y la distancia de visibilidad disponible, pero también depende en gran medida de las características del conductor y de las capacidades de deceleración y aceleración del vehículo. Por ello, es complejo predecir la velocidad de operación en secciones rectas.

Estimación de la velocidad en condiciones de nocturnidad

No hay demasiados estudios que hayan obtenido resultados respecto a la diferencia entre las velocidades desarrolladas por el día y las desarrolladas por la noche.

Modelos aplicables únicamente a perfil llano

La mayor parte de los modelos se basan en la predicción de las velocidades de dos carriles con dos sentidos de circulación en perfil longitudinal relativamente llano, generalmente con pendiente entre -4 % y +4 %, aunque existen algunos en los que sí que se ha considerado un mayor rango de pendientes.

Estimación únicamente del percentil 85 de velocidad

La mayor parte de los modelos únicamente estiman un percentil específico de la velocidad, el percentil 85, y no distinguen entre los factores de la velocidad media y los factores de la dispersión de la velocidad, lo que provoca resultados que muchas veces son difíciles de interpretar. Por ejemplo, es posible que una carretera con una alta velocidad media y una baja variabilidad en las velocidades tenga el mismo percentil 85 de velocidad que una carretera con una velocidad media baja y una alta variabilidad. La modelización de la distribución entera de las velocidades en flujo libre, como han sugerido algunos autores, puede rectificar este problema.

Región de toma de datos

Como ya se ha citado anteriormente, los modelos calibrados en diferentes regiones o países presentan, en general, estructuras, variables o coeficientes distintos. Esto es debido a la diferencia en el comportamiento de los conductores.

Castro et al. (2012) han llevado a cabo una revisión de los principales modelos para la estimación de la velocidad de operación en carreteras de dos carriles con dos sentidos de circulación. Los modelos seleccionados han sido aplicados en nueve tramos de carreteras españolas con diferentes tipos de perfil longitudinal, estudiando las diferencias observadas en la velocidad estimada con cada uno de ellos.

Además, se ha llevado a cabo una toma de datos de velocidad mediante dispositivo laser en 11 curvas con radio entre 150 y 2000 metros, con más de 150 mediciones de velocidad en flujo libre en cada una de ellas. Al aplicar los diferentes modelos en

ellas y calcular la raíz del error cuadrático medio correspondiente, se ha comprobado que el modelo que menor error produce es el calibrado a partir de datos de velocidad registrados en carreteras españolas (Castro et al., 2008), a pesar que este fue calibrado únicamente con datos de 18 curvas.

Por tanto, puede concluirse que, para la estimación de la velocidad de operación en una determinada región, es preferible utilizar un modelo calibrado a partir de datos registrados en carreteras de la misma. Esta conclusión puede aplicarse también a los modelos para la estimación de las tasas de aceleración y deceleración y para la estimación de los decrementos de velocidad de operación.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal del presente trabajo de investigación es la caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales, no sólo desde el punto de vista de la influencia de la geometría de la carretera, sino también considerando las características del conductor y del vehículo.

Todo ello con base no en datos puntuales de velocidad o en datos continuos obtenidos mediante vehículos instrumentados o simuladores de conducción con una muestra de conductores seleccionada previamente, sino en datos continuos obtenidos de los conductores reales de la carretera.

De esta forma, los modelos y los resultados procedentes de la caracterización de la velocidad, con una muestra de tamaño similar, pueden ajustarse más al comportamiento real de los conductores.

Con el desarrollo de modelos para la estimación de la velocidad de operación en secciones curvas y rectas y la estimación de la tasa de deceleración y aceleración entre ellas a partir de características geométricas, se ofrece un herramienta esencial para la evaluación de la consistencia de las carreteras convencionales en España, ya que, como se ha visto en el apartado de estado del arte, en general, los modelos calibrados a partir de datos de un país no suelen caracterizar adecuadamente el comportamiento de los conductores de otro.

Por otra parte, la caracterización de la velocidad en función de las características sociológicas del conductor, las características del viaje y las del vehículo, pueden proporcionar orientaciones sólidas y eficaces a las personas con responsabilidad en el diseño de programas de intervención dirigidos a cambiar el comportamiento del conductor respecto a la velocidad.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para la consecución del objetivo principal es necesario completar los siguientes objetivos específicos:

- Diseño de una toma de datos naturalística que permita la obtención de perfiles continuos de velocidad de vehículos circulando en flujo libre a lo largo de un tramo de carretera, así como también la trayectoria descrita por los mismos. Los conductores de estos vehículos no deben ser seleccionados previamente sino que se debe tratar de aquellos que realmente se encuentran circulando por la vía.
- Desarrollo de un procedimiento para la restitución de la geometría de la vía a partir de las trayectorias individuales de una muestra de vehículos.
- Desarrollo de un procedimiento para la obtención, a partir de los datos registrados, de los perfiles de velocidad continuos de cada vehículo y de los distintos percentiles obtenidos a partir de estos para cada tramo de carretera.

- Estudio de la influencia de las variables geométricas de los tramos de carretera en las velocidades desarrolladas en cada uno de los elementos, distinguiendo entre rectas y curvas.
- Estudio de la influencia de las variables geométricas de los tramos de carretera en las tasas de deceleración y aceleración y en los diferenciales de velocidad en las transiciones recta-curva.
- Desarrollo de modelos que permitan estimar la velocidad de operación en secciones de recta y de curva en función de las características geométricas del trazado.
- Desarrollo de modelos que permitan estimar las tasas de deceleración y aceleración y los diferenciales de velocidad en función de las características geométricas del trazado.
- Elaboración de las reglas constructivas necesarias para la composición del perfil continuo de velocidad de operación de un tramo de carretera a partir de los modelos desarrollados, como base para el análisis de la consistencia del diseño de este.
- Aplicación a los tramos completos de carretera estudiados para la comparación del perfil de velocidad estimado con el perfil de velocidad de operación obtenido a partir de los modelos empleados en el IHSDM. Comparación también de estos perfiles con los perfiles de velocidad de operación procedentes de la toma de datos.
- Estudio de la influencia de las características propias del conductor y del vehículo en la velocidad elegida por el conductor en secciones rectas y curvas.
- Estudio de la influencia de las características propias del conductor y del vehículo en las tasas de deceleración y aceleración elegidas por el conductor.
- Desarrollo de modelos para la estimación de la velocidad en rectas y en curvas y de las tasas de deceleración y aceleración, que engloben no sólo las características geométricas del trazado, sino también las características del conductor, del viaje y del vehículo.

5. HIPÓTESIS

La velocidad desarrollada por los vehículos y las variaciones que experimenta son las variables que mejor permiten caracterizar el comportamiento de los conductores. Este concepto de velocidad a la que operan los conductores es conocido como velocidad de operación.

La velocidad de operación de un tramo de carretera se identifica con el percentil 85 de la distribución de velocidades obtenida de los vehículos ligeros que por él circulan en condiciones de flujo libre y sin restricciones ambientales.

Se considera que un vehículo circula en flujo libre cuando su velocidad no se ve condicionada por la del vehículo que le precede. En las investigaciones anteriores se han utilizado distintos valores para el intervalo que asegura esta condición, siendo el más empleado el de 5 segundos, por lo que será este el que se aplique en la metodología utilizada en el presente trabajo de investigación.

En la mayor parte de los estudios y modelos existentes, debido a la falta de datos continuos de velocidad, se ha considerado que la deceleración y la aceleración tienen lugar únicamente en los tramos rectos de la carretera, suponiendo constante la velocidad en las curvas horizontales e igual a la del punto medio de esta. Sin embargo, la presente investigación, al contar con datos continuos de velocidad, parte de la hipótesis de que los conductores adecuan la velocidad desde la recta a la curva progresivamente, de forma que su deceleración/aceleración tiene lugar tanto en el tramo recto como en el tramo curvo. Por ello, se considera que la velocidad en la curva no tiene por qué mantenerse constante y la mínima velocidad desarrollada en ella no tiene por qué presentarse en el punto medio.

Por otra parte, en cuanto a los diferenciales de velocidad, se considera que la simple diferencia de la velocidad en recta y la velocidad en curva correspondientes al percentil 85 no representa adecuadamente el comportamiento de los conductores ya que la distribución de las velocidades en recta y en curva no es la misma, y, aunque lo fuera, el conductor correspondiente al percentil 85 en recta no tiene por qué ser el mismo que el correspondiente al percentil 85 en curva. Por tanto, para una mejor adaptación al comportamiento de los conductores, en lugar de estudiar el incremento de V_{85} y la deceleración y aceleración calculadas a partir del perfil de velocidad correspondiente al percentil 85, se estudiará el percentil 85 del incremento de la velocidad y el percentil 85 de la deceleración/aceleración desarrolladas por los conductores.

Para obtener estos parámetros a estudiar, la metodología de toma de datos y procesamiento de estos, debe permitir obtener los perfiles continuos de velocidad desarrollados en un tramo de carretera por conductores que sean usuarios reales de la misma (no voluntarios conocedores de los objetivos de la investigación). Obteniendo, con la misma metodología, la restitución de la geometría del trazado, es posible estudiar el comportamiento de los conductores en función de la velocidad desarrollada y de las aceleraciones y deceleraciones observadas. Del mismo modo, se podrá analizar la influencia que las características geométricas del trazado tienen sobre la elección de la velocidad por parte de los usuarios.

Para que los datos obtenidos se correspondan con el comportamiento real de los conductores, estos no deben sentirse condicionados por su inclusión en la investigación. Se considera que la presencia de los investigadores, su interacción con los conductores y la incorporación de un dispositivo GPS de pequeño tamaño en el vehículo no supone un cambio significativo en el comportamiento de los conductores.

A partir de estos datos, será posible obtener modelos de estimación de las velocidades de operación desarrolladas en rectas y curvas y modelos de estimación de las tasas de deceleración/aceleración y de los diferenciales de velocidad en las transiciones recta-curva, que, con el mismo tamaño de muestra, se ajusten más al comportamiento real de los conductores que los modelos de investigaciones anteriores basados en datos puntuales o en datos continuos obtenidos a partir de la utilización de vehículos instrumentados o simuladores de conducción, en los que los conductores eran voluntarios conocedores del objetivo de la investigación.

Los anteriores párrafos se basan en el estudio del percentil 85 de la velocidad de operación, es decir, en el estudio de datos agregados. Sin embargo, como se ha hecho referencia anteriormente, al utilizar datos agregados, se reduce la naturaleza de la variabilidad asociada con la función de regresión, así la influencia de los elementos geométricos puede estar sobrevalorada o subvalorada. Aceptando esta hipótesis, es necesario estudiar también la influencia de las características geométricas del trazado sobre las velocidades individuales de los conductores.

En la velocidad elegida por un conductor no influyen únicamente las características geométricas de los conductores, sino también otras variables, como las propias características sociológicas del conductor y el tipo de vehículo utilizado. La introducción de estas variables en el estudio puede permitir explicar una mayor variabilidad de la velocidad.

6. MÉTODO

El objetivo principal del presente trabajo de investigación es la caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales, no sólo desde el punto de vista de la influencia de la geometría de la carretera, sino también considerando las características del conductor y del vehículo.

Así, en los siguientes apartados, se detallará la metodología a seguir con el fin de alcanzar el citado objetivo. En primer lugar se describirá cómo llevar a cabo la toma de datos, para proseguir con la descripción de los pasos a seguir en el tratamiento y análisis de los mismos.

6.1. TOMA DE DATOS

Para la consecución del objetivo de la presente investigación los datos necesarios son:

- Los perfiles continuos de velocidad de una muestra suficiente de conductores circulando por distintos tramos de carreteras convencionales. A partir de ellos, se han obtenido tanto los perfiles continuos de velocidad individuales, como los perfiles continuos de distintos percentiles, de la media y de la desviación típica.
- Las trayectorias descritas por esos mismos conductores, con las que estimar la geometría del trazado de los distintos tramos.
- Datos referentes a las características sociológicas de los conductores y datos sobre el viaje y sobre el vehículo, que puedan influir sobre la velocidad elegida.

La reducción de costes en la tecnología GPS, pone al alcance una serie de equipos que permiten el seguimiento de vehículos, tanto en tiempo real como de manera pasiva. En este último caso, se almacenan, con cierta cadencia, datos de posición y tiempo que pueden ser descargados al ordenador para su posterior tratamiento.

Utilizando equipos GPS de seguimiento pasivo con cadencia de toma de datos de, al menos, 1 segundo y seleccionando una muestra suficiente de vehículos que realicen el mismo recorrido en ambos sentidos de un tramo de vía, es posible calcular la velocidad en cada punto de este y la trayectoria media desarrollada por ellos para, a partir de ella, estimar la geometría del trazado de la vía.

Las pruebas para la obtención de estos datos deben realizarse en circulación libre, es decir, con una separación entre vehículos de, al menos, 5 segundos, evitándose así un posible condicionamiento.

De esta forma, es posible obtener los dos primeros grupos de datos mencionados. El tercer grupo de datos se ha obtenido de encuestas directas a los conductores.

6.1.1. **Pruebas experimentales iniciales**

Para comprobar la validez de los rastreadores autónomos GPS y fijar criterios para el posterior modelo de toma de datos, así como también para depurar los algoritmos a utilizar para el tratamiento de los datos obtenidos con los dispositivos, se llevaron a cabo sendas pruebas iniciales en tramos de carretera seleccionados previamente por sus características, tanto de trazado como de tráfico.

La primera prueba se realizó en condiciones de circulación en flujo libre a lo largo de un tramo de longitud inferior a 4.50 km, de la carretera CV-339 situado al nordeste del municipio de Casinos (Valencia). Este tramo (figura 6.1) fue elegido por varias razones, destacando la baja IMD que presenta, así como también su variedad en elementos de trazado.

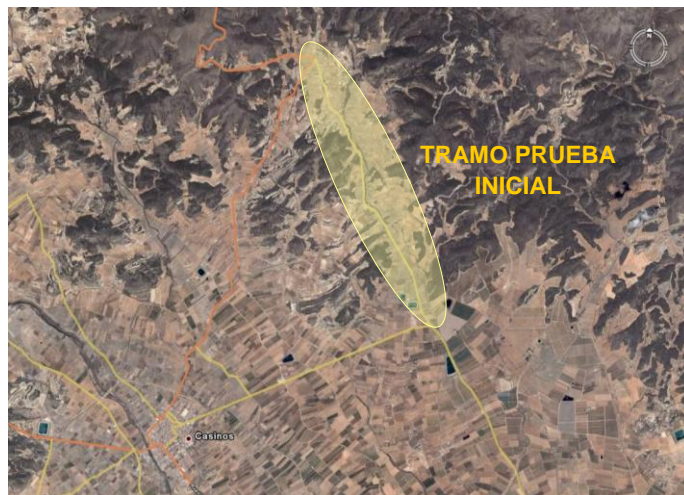


Figura 6.1 Situación del tramo de la primera prueba inicial

Una baja IMD permite la circulación libre de los vehículos equipados con los rastreadores GPS, de forma que se cumpla una de las premisas del estudio de la velocidad de operación. No obstante, al analizar los datos resultantes de las pruebas experimentales hay que prestar especial atención a la presencia de vehículos agrícolas que disminuyen sustancialmente la velocidad del resto. Por ello, hay que tener en cuenta en el análisis, los tramos en los que el conductor se ve condicionado por causas externas al trazado de la vía.

El tramo seleccionado para la prueba inicial presenta, en su corta longitud, distintos elementos de trazado en planta: tramos rectos, curvas con distintos radios y zonas con sucesión de curvas. Asimismo, en el trazado en alzado, se distinguen tramos con diferentes pendientes y acuerdos verticales.

Otro aspecto que marcó la decisión es la presencia al inicio y al final del tramo de una glorieta y una intersección con un camino rural, respectivamente, con espacio suficiente para, en pruebas posteriores, establecer los controles en los que detener los vehículos sin interferir en el resto del flujo de tráfico (ver figura 6.2). Asimismo, la

glorieta supone un moderador de la velocidad, facilitando así la detención de vehículos sin poner en riesgo ni la seguridad de las personas que se encuentran en el punto de control ni la del resto de los conductores.



Figura 6.2 Ubicación de los controles de la primera prueba inicial

Además, a lo largo de todo el tramo, las únicas intersecciones existentes tienen lugar con vías de marcado carácter rural o accesos a propiedades privadas, con lo que su influencia en el flujo de la vía principal es mínima (ver figura 6.2).



Figura 6.3 Intersecciones no significativas

Durante el desarrollo de la prueba inicial se realizaron distintas mediciones de la sección de calzada a lo largo del tramo, concluyendo que se trata de una calzada de 6 m de anchura con ausencia de arcenes, dotada de una señalización horizontal con 15 cm de anchura de línea continua de borde.



Figura 6.4 Medición de la sección transversal

La prueba inicial consistió en la realización de una serie de trayectorias. Para ellas, se eligió a un grupo de cinco conductores con características muy diversas en cuanto a edad, sexo, experiencia en la conducción, etc.

Cada conductor llevó a cabo 8 recorridos, 4 en dirección norte y 4 en dirección sur, acompañado en todo momento por una persona encargada de anotar las distintas

incidencias que pudieran presentarse y los momentos en que el conductor sintiera condicionada su conducción.

Para la prueba llevada a cabo se utilizó 1 rastreador GPS autónomo ubicado en un BMW 116i de 116 CV, presentado en la figura 6.5. Este vehículo, al pertenecer a una gama media, supone una aproximación adecuada a los vehículos que serán estudiados en las pruebas posteriores.



Figura 6.5 Vehículo empleado en las pruebas iniciales

Los datos recogidos por el rastreador GPS se presentan con formato latitud-longitud-tiempo-altitud. De esta forma, disponiendo de un reloj digital es posible anotar el momento en el que el conductor se siente condicionado, por ejemplo, por un vehículo que circula a menor velocidad y, por tanto, se ve obligado a adelantarlo sin mantener una circulación en flujo libre. Del mismo modo, siguiendo este método, es posible tener en cuenta durante el análisis de los datos las distintas incidencias que se hayan producido durante la realización de las pruebas.

Durante las primeras trayectorias se instaló una cámara de video en el reposacabezas del conductor con el fin de tener una grabación en la que quedaran registradas, desde el punto de vista de este, las distintas características de la vía, así como la señalización y las intersecciones existentes. De esta forma, es posible, también, estudiar la visibilidad de la vía e identificar los posibles obstáculos que la dificulten.

Posteriormente, se realizó una segunda prueba con el fin de verificar el comportamiento de los algoritmos frente a diferentes trazados. El tramo de vía seleccionado, de aproximadamente 2 Km de longitud y delimitado por glorietas, pertenece a la CV-305. Se trata de una vía con trazado moderno, constituido por curvas amplias dotadas todas ellas de clotoides.



Figura 6.6 Situación del tramo de la segunda prueba inicial

El desarrollo de la segunda prueba fue similar al descrito para la primera, realizándose 30 recorridos (15 en cada dirección).

Las pruebas realizadas permitieron establecer una serie de criterios experimentales en los que basar pruebas posteriores. En ellas, se han empleado 50 rastreadores GPS que fueron colocados en una muestra suficientemente amplia de los vehículos que circulaban por un tramo de carretera debidamente acotado mediante controles de tráfico, consiguiendo, de esta forma, una muestra representativa de la circulación en él. A los datos obtenidos de las trayectorias con estas pruebas se han aplicado los distintos algoritmos que, gracias a las pruebas iniciales, fueron desarrollados y depurados.

6.1.2. Diseño experimental

Con base en la experiencia de las pruebas experimentales iniciales se presenta a continuación el diseño experimental a tener en cuenta para llevar a cabo las diferentes campañas de toma de datos de las que se han obtenido los datos necesarios para el desarrollo de la investigación.

En este apartado de diseño experimental se muestra la totalidad de procesos a realizar para la recogida de los datos para la investigación. En primer lugar aparece el proceso experimental en sí, detallando los pasos a realizar tanto antes como después de la recogida de datos. En los siguientes apartados aparece una descripción del material a utilizar, una relación de las características básicas que deben tener los tramos en los que tomar datos y una descripción de la importancia de realizar una prueba piloto.

6.1.2.1. Procedimiento experimental

Al hablar de procedimiento experimental hay que tener en cuenta también el trabajo necesario de gabinete para la preparación de cada una de las pruebas.

Antes de comenzar con la experimentación hubo que diseñar e imprimir tanto los folletos informativos que se iban a entregar a los conductores, como las encuestas con la relación de preguntas que se les iban a realizar.

Asimismo, un trabajo previo es la instalación del software específico en los ordenadores en los que descargar la información de los GPS, la configuración de dichos dispositivos y garantizar que la memoria de los mismos está libre y preparada para la captura de datos.

Por otro lado, después de cada prueba hubo que proceder a la importación de datos de los GPS y al posterior vaciado de memoria de los mismos con el fin de prepararlos para la siguiente. En esta preparación hay que incluir también la retirada de las baterías durante el intervalo de tiempo entre pruebas y la posterior colocación antes de cada una, con el fin de evitar un consumo y una captura de datos innecesaria.

Una vez realizados y comprobados los trabajos previos de gabinete se procedió a los trabajos de campo.

Los dispositivos fueron colocados en una muestra de vehículos que circulaban en condiciones de flujo libre por un tramo de carretera debidamente acotado. En cada uno de los tramos fue necesario instalar controles de tráfico al inicio y al final de cada sentido de circulación, en los que se entregaban y recogían los dispositivos. El esquema global del corte realizado en la vía se muestra en la figura 6.7.

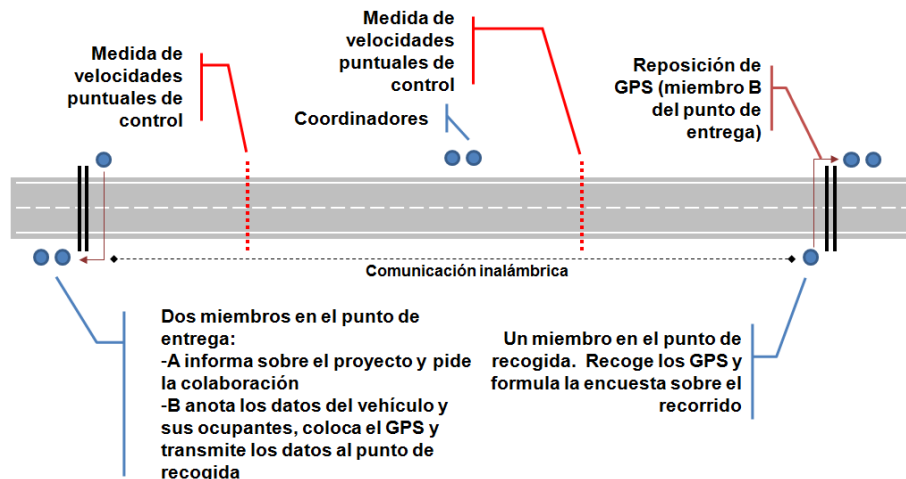


Figura 6.7 Esquema global de la instalación de los controles para la toma de datos

La duración de la operación de entrega del GPS, incluyendo el suministro de la información correspondiente a los conductores y la realización de la encuesta

correspondiente para la toma de datos del conductor, del viaje y del vehículo, se estimó en aproximadamente 2 minutos para cada vehículo.

Durante este tiempo, la circulación permanecía cortada. Cuando la longitud de la cola creada por los controles era apreciable, se permitía el paso de los vehículos sin proceder a la instalación del GPS durante cierto tiempo, con el fin de no perjudicar excesivamente la circulación global de la vía. Una vez evacuado el volumen adecuado de vehículos se continuaba con la toma de datos.

Los puntos de control deben ser, necesariamente, implantados por la cuadrilla de conservación destinada a esa tarea por la administración titular de la carretera por lo que el tiempo aproximado de duración de las pruebas debía ser establecido previamente.

Las pruebas tuvieron una duración aproximada de cuatro horas, sin embargo se considera que el personal permanecía en el lugar, aproximadamente, seis horas por el tiempo empleado en la preparación de los controles y en la toma de medidas de la sección transversal en distintos puntos de la vía.

Anteriormente, se ha fijado 2 minutos como tiempo necesario de interacción con el conductor voluntario. Por tanto, en una hora se entregaban aproximadamente 30 GPS por sentido de circulación, con lo que en 4 h se consideraba que se podía alcanzar un tamaño de muestra de 120 trayectos por sentido (un total de 240 trayectos). Para tramos con algo menos de demanda fue necesario prolongar la toma de datos, llegando hasta 5 horas.

Las pruebas se realizaron en hora valle matinal por lo que comenzaron a partir de las 9:00 h y finalizaron en torno a las 13:00 h, o a las 14:00 h en el caso tramos con baja demanda.

6.1.2.2. Medios empleados en la toma de datos

En este apartado se considera tanto el material necesario para la realización de las pruebas como el personal que se precisa para su buen funcionamiento, teniendo en cuenta la rapidez y eficacia con la que deben realizarse para minimizar los trastornos que puedan producirse a los conductores.

Entre los distintos materiales necesarios destacan los, ya citados, rastreadores GPS. Sin embargo, hay otros sin los cuales no podrían haberse realizado las pruebas adecuadamente. Por ello, se han distinguido entre consumibles, pequeño material inventariable y material inventariable.

Consumibles

Para las pruebas que se han llevado a cabo se precisaron una serie de consumibles, como son: pilas AAA para los rastreadores GPS, libretas y bolígrafos, formularios y encuestas, cintas para las cámaras de video, y pintura.

También, para facilitar el proceso de información a los conductores y mostrarles la importancia de su colaboración, se elaboró un folleto o tríptico en el que se explicaban los puntos y objetivos más importantes de la investigación de la que formaba parte el experimento en el que participaban. Este folleto se entregó a los

conductores en el punto de recogida de rastreadores, al agradecerles su colaboración.

Pequeño material inventariable

El pequeño material inventariable que fue utilizado en todas las pruebas se compone de paletas de señalización manual STOP, identificaciones, chalecos reflectantes y gorras con el logotipo de la UPV, 2 destornilladores y cinta métrica.

El personal que se encontraba en los puntos de control debía ir adecuadamente identificado, con el fin de dar confianza a los conductores a los que se les solicitaba colaboración y agilizar, de este modo, la explicación que se les daba a la entrega de los GPS. Además, debía tener disponibles paletas de señalización manual para utilizarlas en caso de ser necesario reorganizar el tráfico.

Asimismo, todo el personal debía llevar el correspondiente chaleco reflectante por cuestiones de seguridad. Cada chaleco llevaba el logotipo de la Universidad Politécnica de Valencia.

Por otra parte, para cambiar las baterías de los aparatos fue necesario adquirir, al menos, dos destornilladores de la medida apropiada. Se disponía de estas herramientas en todas las pruebas, así como también de pilas, para poder cambiarlas si hubiera surgido algún imprevisto, aunque se instalaron pilas nuevas en todos los dispositivos antes de proceder a la realización de cada prueba.

Finalmente, en cada prueba se tomaron medidas de la sección transversal en distintos puntos de tramo, por lo que fue necesario disponer de una cinta métrica.

Material inventariable

El material inventariable que se utilizó en el desarrollo experimental se compuso de rastreadores GPS, teléfonos móviles, cámaras de video y cámaras de fotos.

Para las pruebas que se han llevado a cabo son necesarios 50 rastreadores GPS, autónomos entre sí, alimentados eléctricamente mediante pilas AAA recargables. Dichos rastreadores se basan en la señal de más de 16 satélites, con una precisión superior a 2,5 metros, siendo la cadencia de datos de 1 segundo.

En la figura 6.8 se muestra uno de los dispositivos GPS colocado sobre el techo de un vehículo.



Figura 6.8 Rastreador GPS

El rastreador transmite perfectamente la señal, incluso colocado en el interior del vehículo, a pesar de estar sometido a dificultades físicas que dificulten su recepción. De hecho, las pruebas preliminares de seguimiento realizadas con el primer rastreador adquirido proporcionaron resultados altamente satisfactorios en cuanto a su precisión.

Cada rastreador almacena los datos de latitud, longitud, altitud, rumbo, fecha y hora. La memoria disponible es de aproximadamente 100 horas. Una vez realizadas las mediciones, mediante una salida USB, conectada directamente desde el aparato a un PC convencional, es posible proceder al volcado de los datos registrados.

El dispositivo descrito se ubicó sobre el techo o el capó de los vehículos gracias al potente imán que posee, centrado en el mismo.

Cada rastreador iba adecuadamente identificado para facilitar el control, tanto en la entrega como en la recogida de los mismos, y el recuento final, con el fin de comprobar que no se había extraviado ninguno.

Por otra parte, para mantener la comunicación entre los puntos de control, fue necesario disponer de teléfonos móviles.

Asimismo, se precisaron dos cámaras de video para la comprobación de observación naturalística, cuyo procedimiento se detalla en apartados siguientes. Se precisaron también los correspondientes trípodes.

Finalmente, con dos cámaras fotográficas se recogió información gráfica con la que ilustrar el desarrollo de cada prueba.

Personal

Para el adecuado desarrollo de la prueba se contó con seis personas: dos personas en cada control de entrega de GPS y una en cada control de recogida de GPS. En los casos en los que la IMD del tramo era baja la toma de datos se llevaba a cabo únicamente con 4 personas.

En los controles de entrega se requería la presencia de dos personas ya que, mientras una de ellas informaba al conductor de las pruebas para las que se requería su colaboración y le hacía una serie de preguntas, la otra colocaba el rastreador en el vehículo y anotaba los datos fácilmente detectables como el modelo del vehículo, el color, la matrícula, el sexo del conductor, la edad aproximada del conductor, el número y el tipo de ocupantes, etc. Esta última se encargaba también del intercambio de GPS entre el punto de control de recogida y el de entrega.

La persona que interactuó con los conductores, en cada uno de los tramos de estudio para requerir su colaboración, no sólo les explicó el ámbito de investigación en el que se incluyó la toma de datos, sino que también les invitó a realizar el recorrido según su conducción habitual, de forma que su comportamiento no se viera afectado por la presencia del equipo, resaltando la adscripción de este a la Universitat Politècnica de València.

Las personas situadas en el control de recogida formularon a los conductores unas breves preguntas de evaluación de las velocidades practicadas y les entregaron un tríptico de la investigación dándoles las gracias por su colaboración.

Por otro lado, dos personas del grupo de investigación se encargaron de la supervisión del desarrollo de las pruebas, solventando cualquier incidente que pudiera surgir. En función del tramo, estas personas se dedicaron únicamente a la supervisión o colaboraron en la toma de datos.

Todo el personal iba adecuadamente identificado y equipado con chalecos reflectantes y gorras con el logotipo de la Universitat Politècnica de València, favoreciendo de esta forma la comprensión, confianza y colaboración de los conductores.

Las personas que se encontraban en los controles debían estar adecuadamente comunicadas con los del extremo opuesto del tramo mediante teléfonos móviles, así como también con los supervisores, con el fin de conocer cualquier incidencia que se produjera.

Adicionalmente, en cada uno de los extremos se contó con la presencia de personal de conservación de la vía para facilitar la detención de los vehículos y la gestión del tráfico.

6.1.2.3. Características básicas de los tramos de carretera de toma de datos

A la hora de establecer la localización de las pruebas a realizar se tuvieron en cuenta una serie de factores que determinaron su elección.

Uno de los factores más importantes es la intensidad de vehículos ligeros. En este trabajo de investigación se estudian exclusivamente las velocidades de los vehículos ligeros, por lo que la intensidad de pesados no debe ser excesiva ya que su presencia condiciona negativamente la operación de los anteriores. Por otra parte, para una óptima utilización de los rastreadores, la intensidad horaria por sentido de circulación debe ser superior a 30 vh/h. En principio, no sería recomendable una vía con una IMD muy alta para mantener una circulación en flujo libre. Sin embargo, al establecer controles tanto a la entrada como a la salida, este es un factor que resulta irrelevante a la hora de establecer la localización de las pruebas; no obstante, hay que considerarlo especialmente para producir los mínimos trastornos a los conductores.

La longitud del tramo de pruebas es un parámetro que merece especial consideración ya que de su elección depende que se consiga, o no, un adecuado y eficaz funcionamiento de las pruebas sin llegar a romper la cadena de entrega y recogida de aparatos rastreadores. En su determinación se han considerado los siguientes aspectos:

- Debía ser un tramo en el que no existan intersecciones que aporten un flujo de tráfico considerable a la zona de pruebas. Hay que tener en cuenta que estos nuevos vehículos podrían condicionar la circulación de aquellos equipados con los dispositivos GPS y, por tanto, producir resultados influenciados no válidos para el estudio.

- La longitud no debía ser excesiva, siendo así poco probables los alcances entre los vehículos implicados en la investigación a los que se les daba vía libre cada 2 minutos aproximadamente, con el fin de mantener la circulación en flujo libre.
- Debía tener una longitud adecuada para el número de GPS, de forma que ningún punto de control se quedara sin dispositivo alguno que entregar a los conductores, considerando una demora de 2 minutos por entrega de estos a los conductores voluntarios. Se ha considerado que en cualquier punto de control debe haber siempre, al menos, 5 GPS.
- Las personas ubicadas en los controles debían estar intercomunicados por lo que se tuvo en cuenta la cobertura de teléfonos móviles a la hora de seleccionar los tramos (principalmente condicionantes orográficos).

Atendiendo a los aspectos citados, se concluyó que una longitud óptima para los tramos de prueba era, aproximadamente, entre 5 y 10 Km, limitados preferiblemente por elementos que moderen la velocidad de los vehículos de forma que sea más sencillo detenerlos en los necesarios controles en sus extremos.

6.1.2.4. Prueba piloto

La primera de las pruebas se consideró como prueba piloto. En ella se realizó la implantación del procedimiento a seguir en las siguientes, de forma que se establecieron nuevos criterios en función de las dificultades que se encontraron.

A partir de esta prueba se estableció el número de pruebas a realizar en las siguientes con el fin de obtener una muestra representativa ya que se supone que su dispersión será similar a las del resto.

En las pruebas experimentales iniciales, los conductores estaban acompañados en todo momento por una persona encargada de anotar las distintas incidencias y los momentos en que el conductor sintiera condicionada su conducción. Esta sería la situación ideal, sin embargo es imposible asignar una persona a cada vehículo de la muestra por lo que fue necesario establecer un procedimiento para verificar el no condicionamiento de la circulación. El condicionamiento de la conducción debido a otros vehículos con una velocidad inferior o por alguna otra causa ajena al procedimiento es posible detectarlo tras la observación de los perfiles de velocidad individuales y la comparación de estos con el resto de las observaciones y con los correspondientes a los distintos percentiles. Este procedimiento se explicará detalladamente en el apartado correspondiente al tratamiento de los datos.

Por otra parte, ha sido necesario comprobar también si los conductores se sentían condicionados y variaban su velocidad al sentirse parte de un estudio. De esta forma, se comprobó que se trata de una observación naturalística de la evolución de los vehículos.

Esta comprobación se llevó a cabo en la prueba piloto. La comprobación de observación naturalística se basó en la medición de velocidades puntuales en una sección determinada, antes y durante las pruebas, con el fin de poder comparar ambas situaciones y determinar si se presenta una diferencia significativa.

La medición se realizó mediante un software de restitución de trayectorias a partir de grabaciones de video. Las grabaciones se realizaron transversalmente a la vía, ocultando adecuadamente las cámaras para evitar una posible influencia en los conductores. Fue necesario disponer de cuatro referencias separadas entre sí una distancia conocida con el fin de poder referenciar el sistema de coordenadas en el que basar la restitución de las trayectorias. Por el motivo citado en el caso de las cámaras, estas referencias no debían ser perceptibles por los conductores, por lo que consistieron en marcas en la calzada de 10x30 cm o incluso inferiores en lugares estratégicos, por ejemplo dos de ellas podían ser las marcas discontinuas del eje de calzada, pero siempre remarcadas para poder distinguir las en el video.

La medición de las velocidades puntuales se llevó a cabo en dos puntos intermedios del tramo de prueba: en una sección que permita una circulación lo suficientemente libre (tramo recto) y en una sección que suponga un control de la velocidad (tramo curvo de radio intermedio).

6.2. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Con la metodología de toma de datos naturalísticos descrita se permitió la obtención de perfiles continuos de velocidad de los vehículos que circulaban por un tramo de carretera, además de la trayectoria seguida por los mismos. Con esta metodología también se obtuvieron datos sobre las características sociológicas de los conductores, del viaje que estaban realizando y del tipo de vehículo que conducían.

Sin embargo, sin un adecuado tratamiento de los datos brutos, su utilización para el estudio del comportamiento de los conductores no es posible. Por ello, tras la toma de datos, la siguiente etapa consistió en el tratamiento de los datos obtenidos. Esta fase se divide en dos, debido a las diferentes características de los datos procedentes de las encuestas y de los datos almacenados por los dispositivos GPS.

6.2.1. Tratamiento de los datos de las encuestas

Tras la realización de las diferentes campañas de toma de datos, se disponía de una gran cantidad de encuestas realizadas a los conductores. En etapas posteriores, estos datos tendrían que ser relacionados con los correspondientes perfiles de velocidad. Por ello, el primer paso en el tratamiento de los datos consistió en la identificación de cada uno de los conductores. Con este fin, se codificó cada conductor mediante una sucesión de caracteres alfanuméricos, en los que se incorporó el número de prueba en la que se tomaron los datos, el número de GPS, si se trataba de ida o de vuelta y el número de recorrido. Codificando de esta forma también los perfiles de velocidad, la correlación entre datos fue más sencilla.

A continuación, fue necesario estudiar cada una de las variables de las que se obtuvieron datos en las encuestas, diferenciando si se tratan de variables cualitativas o cuantitativas. A las variables cualitativas, especialmente, fue necesario asignarles un código numérico, ya que en el análisis posterior, en el que se utilizó principalmente la regresión, todas las variables debían tener carácter numérico.

De esta forma, se consiguió una base de datos en la que cada recorrido individual tenía asignadas sus correspondientes características.

6.2.2. Tratamiento de los datos procedentes de los GPS

La aplicación de la metodología de toma de datos mediante dispositivos GPS dio como resultado datos continuos de posición de una muestra suficientemente amplia de vehículos circulando por diferentes tramos de carretera.

Los datos tomados se presentaron en formato latitud-longitud-altitud-rumbo-hora-fecha-velocidad. Para los fines de la investigación, fue necesario llevar a cabo una serie de procesos de depuración y tratamiento de los datos para obtener finalmente una estimación de la geometría de los tramos de carretera estudiados y los perfiles continuos de velocidad individuales y los correspondientes a los diferentes percentiles.

Para ello, ha sido necesario desarrollar diferentes algoritmos que hicieran este proceso viable, debido a la gran cantidad de datos a tratar.

6.2.2.1. Depuración y tratamiento de los datos

Los datos disponibles fueron almacenados por los GPS con una cadencia de 1 segundo según las componentes de latitud-longitud-altitud-rumbo-fecha-hora-velocidad. Por diferentes razones, el listado de datos puede contener algún error de almacenamiento, por lo que fue necesario revisarlo y llevar a cabo una primera depuración de los datos.

Una vez depurados los datos, el siguiente proceso consistió en realizar una transformación de coordenadas, de longitud-latitud a coordenadas (x,y) locales, que facilitaran el tratamiento de datos posterior.

Llegados a este punto, se disponía de un listado de puntos para cada tramo de carretera, diferenciando tantos grupos de datos como dispositivos GPS se utilizaron en cada una de las jornadas de toma de datos. Cada dispositivo podía haber registrado en cada prueba datos de diferentes conductores, agrupados todos en único recorrido. Por ello, fue necesario identificar las diferentes trayectorias individuales y eliminar los datos que se encontraban fuera del tramo de carretera correspondiente. Con este fin, se identificaron los puntos inicial y final de cada una de ellas, que debía coincidir con el inicio y final del tramo.

Una vez identificadas cada una de las trayectorias individuales, se revisó gráficamente cada una de ellas, con el fin de descartar del análisis aquellas que presentaban un comportamiento fuera de lo normal, como por ejemplo un desvío.

Con el resto de los datos, se procedió a la obtención de la restitución de la geometría del trazado de los diferentes tramos de carretera. Para ello, en primer lugar fue necesario obtener, para cada tramo, la trayectoria media de todas las trayectorias individuales, incluyendo ambos sentidos de circulación.

A partir de la trayectoria media, se calcularon el diagrama de curvaturas y el diagrama de azimuts, correspondientes. Tras el estudio de ambos, se evaluó la

posibilidad de obtener una aproximación a los datos geométricos del trazado de los tramos de carretera, a partir de cada uno de ellos. Una vez elegido el diagrama, de entre los dos citados, que presentó menor variabilidad dependiendo de los datos de entrada y que mejor representación gráfica de la geometría aporte, se estimaron los parámetros necesarios para caracterizar el estado de alineaciones en planta de los diferentes tramos. Como se verá en el apartado correspondiente, el diagrama elegido fue el de azimuts.

Esta estimación consistió en la obtención de la longitud y el radio de las curvas circulares, la longitud y azimut de los tramos rectos y la longitud y parámetro de las clotoides.

Una vez desarrollado el proceso de restitución de la geometría en planta de un tramo de carretera a partir de datos procedentes de los dispositivos GPS ya descritos, fue necesario validarlo. La validación se llevó a cabo mediante dos procedimientos diferentes. Por una parte, se comparó la geometría de un tramo de carretera restituída mediante el procedimiento desarrollado con la aportada en el proyecto de construcción correspondiente. El segundo proceso de validación consistió en la estimación de la geometría de un tramo de carretera a partir de datos procedentes de varios GPS de 1 Hz y de datos almacenados por un GPS de 10 Hz. Estas dos geometrías se compararon y se estudiaron las diferencias.

Una vez obtenida la geometría en planta de cada uno de los tramos de carretera que forman parte de la investigación, se estimó el perfil longitudinal correspondiente.

El último paso en el tratamiento de datos fue la obtención de los perfiles continuos de velocidad individuales de cada conductor registrado en cada uno de los tramos de estudio (ambos sentidos de circulación). Todos los perfiles individuales fueron referenciados a la trayectoria media obtenida en el proceso anterior. De esta manera se facilitó la comparación entre ellos y la agregación para la obtención de los diferentes percentiles.

Para cada uno de los perfiles, el procedimiento de obtención de la velocidad se basó en analizar el tiempo transcurrido entre dos coordenadas, para calcular su valor a partir de los datos de espacio y tiempo.

Una vez obtenidos los perfiles de velocidad individuales, se comprobó que cumplían la condición de flujo libre, es decir que el conductor no se encontraba condicionado por el vehículo precedente. Los datos correspondientes a circulación condicionada fueron eliminados. Si dentro de un perfil, únicamente una zona mostraba signos de condicionamiento, el resto de los datos se mantenían.

Con los datos resultantes se calcularon los sucesivos percentiles de velocidad de operación, a lo largo de cada tramo.

De esta forma, se consiguió disponer, para todos los tramos y sentidos, de las características geométricas de las alineaciones y del perfil de la velocidad de operación correspondiente, calculado a partir de los perfiles de velocidad individuales de vehículos circulando en condiciones de flujo libre.

6.2.2.2. Desarrollo de una aplicación informática

Con el objetivo de poder llevar a cabo todos los procedimientos que conlleva el tratamiento de datos descrito en el apartado anterior de una forma viable, debido a la gran cantidad de datos a tratar, ha sido necesario desarrollar diferentes algoritmos empleando el paquete de Visual Basic implementado en las herramientas de Microsoft Office Excel.

El objetivo de desarrollar las aplicaciones en este programa fue poder manejar sencillamente series de datos de gran longitud. La aplicación desarrollada maneja tablas en Excel, que pueden ser descargadas directamente desde los dispositivos GPS.

El desarrollo de la aplicación se ha realizado para su utilización tanto sobre las versiones 2003, como 2007 y 2010. De esta forma, se mantiene la compatibilidad con la mayor parte de los ordenadores.

Son notables las ventajas de la versión 2007 y 2010 de Microsoft Office Excel para trabajar en este tipo de investigación, principalmente por la capacidad de soportar hojas de mucho mayor tamaño (1.048.576 filas frente a las 65.536 de las versiones anteriores) y permitir gráficos con mayor número de puntos.

Esto conlleva que, al utilizar Excel 2003, en ocasiones la serie de datos de entrada sea superior a la capacidad de las hojas, con lo que es necesario redistribuir los datos en varios archivos.

6.3. ANÁLISIS

El análisis de los datos procedentes del tratamiento descrito en el apartado anterior se ha basado en el estudio de las relaciones entre la velocidad y sus variaciones y las diferentes características geométricas del trazado de la carretera, con el fin de calibrar modelos que permitan su estimación. Asimismo, estos parámetros se han relacionado también con las características del conductor, del viaje que realizaba y del vehículo que conducía, para intentar caracterizar los diferentes estilos de conducción.

Ambos análisis se han realizado tanto para la velocidad en tramos curvos y en tramos rectos, como para las tasas de deceleración y aceleración.

En el caso de las velocidades, se ha incluido en el análisis la media y la desviación típica de la distribución de la velocidad y la velocidad de operación, caracterizada como el percentil 85 de la distribución. Además, en el caso de la velocidad en curvas, se han estudiado las diferencias entre la velocidad mínima en curva del perfil de velocidad de operación, la velocidad de operación en el centro de la curva y el percentil 85 de la velocidad mínima en curva de los conductores individuales.

Al abordar el fenómeno de la deceleración, se han llevado a cabo ambos análisis para el percentil 85 de la tasa de deceleración. Esta tasa se corresponde con el valor de la tasa de deceleración en una transición recta-curva que no es superada por el 15 % de los conductores, al contrario de lo que se ha realizado en la mayor parte de

las investigaciones anteriores, en las que se utilizaba la tasa correspondiente al perfil de velocidad de operación.

Además del estudio de la tasa de deceleración, que permite tras su modelización completar el perfil de velocidad de operación estimado, se ha estudiado el decremento de velocidad entre recta y curva calculado a partir del perfil de velocidad de operación y el percentil 85 de los decrementos de velocidad de los conductores individuales. El análisis ha abarcado tanto la diferencia entre ambos parámetros como la calibración de un modelo que permite estimar el percentil 85 de los decrementos de velocidad a partir de las características geométricas del trazado. Todo ello debido a la gran importancia que estos parámetros tienen en la evaluación de la consistencia del diseño geométrico.

A diferencia de la deceleración, el fenómeno de la aceleración tiene menos influencia en la evaluación de la consistencia, por lo que el análisis correspondiente se ha basado únicamente en el percentil 85 de la tasa de aceleración de los conductores individuales en las transiciones curva-recta.

6.3.1. Estudio de la relación entre las variables

Para el estudio de la influencia de las diferentes variables independientes en la variable dependiente a estudiar se ha llevado a cabo un análisis de correlación, por pares de variables. Para este estudio se ha determinado el coeficiente de correlación de Pearson y se ha contrastado la hipótesis $H_0: \rho \leq 0$, para comprobar si las dos variables están correlacionadas linealmente.

El coeficiente de correlación lineal es un número comprendido entre -1 y +1. Cuanto más próximo es a 1 o -1, tanto mejor es el ajuste entre los datos observados y la recta de regresión y peor cuanto más próximo a cero.

Si el coeficiente de correlación lineal es positivo, la recta de regresión lineal es creciente, por lo que al aumentar los valores de la variable explicativa, tienden a aumentar los valores de la variable respuesta. Por el contrario, si el coeficiente de correlación lineal es negativo, entonces la recta de regresión lineal es decreciente y, al aumentar los valores de la variable explicativa tienden a disminuir los valores de la variable respuesta. Por último, si el coeficiente de correlación lineal es nulo, entonces la recta de regresión es constante y, por término medio, los valores de la variable respuesta no dependen del valor que tome la variable explicativa.

Además, ha sido necesario comprobar que la correlación sea estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 95 %. Para ello el valor-p, o p-valor, debe ser inferior a 0.05.

Como complemento al análisis estadístico de las relaciones entre variables, se ha realizado una representación gráfica de la relación entre las variables dependientes y las independientes que han mostrado mayor correlación estadística.

6.3.2. Desarrollo de los modelos para la estimación del perfil continuo de velocidad de operación

El modelo que permite la estimación de la velocidad de operación en un tramo de carretera convencional, en función de las características geométricas del trazado de este, consiste en la combinación de varios modelos de regresión que permiten estimar la velocidad en rectas y en curvas y las tasas de deceleración y aceleración que las unen. Esta combinación se ha llevado a cabo mediante una serie de reglas de construcción básicas.

La calibración de los modelos que permiten la estimación de cada una de las variables se ha realizado después de analizar las diferentes relaciones obtenidas con el procedimiento descrito en el apartado anterior.

Para la modelización, se ha utilizado generalmente regresión lineal, simple o múltiple. Para ello, el primer paso ha sido comprobar si, estadísticamente, tiene sentido la regresión. Esta comprobación se realiza mediante el análisis de la varianza de regresión, consistente en calcular la F de Snedecor, según se describe a continuación.

Se tiene que la suma de los cuadrados total se descompone en la suma de cuadrados de regresión más la suma de cuadrados residual. Por otra parte, los grados de libertad siempre son: 1, n-2 y 1+(n-2), siendo n el número de casos válidos. Dividiendo la suma de cuadrados entre los grados de libertad, se obtiene la media cuadrática y, dividiendo la media cuadrática de la regresión entre la residual, se obtiene el estadístico de contraste F de Snedecor con 1 y n-2 grados de libertad.

El contraste que se realiza es $H_0 =$ "no existe regresión". Por lo que, con una F de valor obtenido y un p-valor inferior a 0.05, se confirmaría que la regresión es significativa para un 95 % de nivel de significación.

Una vez se constata que la regresión es significativa, hay que considerar la forma que tendrá el modelo.

El modelo de regresión simple, en general, viene dado en población por la ecuación: $Y = \alpha + \beta X + e$, donde Y es la variable dependiente, X es la independiente, α es la ordenada en el origen, β es la pendiente de la recta y e es el error, la diferencia entre los valores reales y los valores predichos por la regresión.

Al utilizar únicamente una muestra, los parámetros α y β se aproximan con los parámetros a y b. Estimando los parámetros a y b, se obtiene la recta de regresión muestral escrita de la siguiente manera: $\hat{y} = a + bx$. El residuo será $E = y - \hat{y}$. Esta recta se da para cada individuo i: $\hat{y}_i = a + bx_i$, para $i = 1, \dots, n$; y, también, $E_i = y_i - \hat{y}_i$, es decir, la diferencia entre el valor observado para cada individuo y su valor predicho según la recta.

Antes de escribir el modelo se deben contrastar las hipótesis siguientes: $H_0: \alpha = 0$ y $H_0: \beta = 0$; es decir, si los parámetros de la recta son o no significativos. Para ello, se utilizará la t de Student. Si para un valor de t, se obtiene un p-valor menor que 0.05, se puede decir que el parámetro es significativo, por lo que entraría en el modelo.

Una vez obtenido cada modelo se comprobó si el modelo era bueno. Para saberlo, se estudió el coeficiente de determinación (R^2), que da en tanto por cien la proporción de variabilidad de variable dependiente que está explicada por el modelo de regresión. Cuanto más se aproxima al 100 % mejor es el ajuste.

Antes de aceptar un modelo se ha examinado si el modelo podía estar influenciado por unas pocas observaciones y si los datos cumplían con las hipótesis de la regresión lineal.

Una hipótesis de la regresión lineal es que para cada valor de la variable independiente, la dependiente debe ser normal. Esto es lo mismo que suponer que los verdaderos errores son independientes con distribución normal $N(0, \sigma^2)$. Las estimaciones de los errores son los residuales, por lo que la estimación de su media será la media de estos valores y la de su varianza también la de estos valores (la media cuadrática de los residuales).

Por tanto, la variable formada por los residuales debe ser normal. Para comprobarlo, hay que hacer el gráfico de probabilidad normal. Además, si los residuos se distribuyen normalmente, los puntos en el gráfico "residual normal quantile – quantile" deben situarse aproximadamente en una línea recta con la media del residuo como intersección y la desviación estándar del residuo como la pendiente.

Otra de las hipótesis de la regresión es que debe haber independencia, es decir, el valor de un individuo no debe estar relacionado con el valor de otro. Esto también se observa por medio de los residuos, los cuales no deben dejar ver ninguna tendencia.

Otro de los supuestos es que la varianza de distribución de la variable dependiente debe ser constante para todos los valores de la variable independiente; es decir, los residuos no deben dejar ver ninguna tendencia respecto a las predicciones o respecto a la variable dependiente.

La regresión se ha llevado a cabo con las variables y con transformadas de estas, como pueden ser funciones logarítmicas, cuadráticas o inversas. De esta forma, ha sido posible aumentar el ajuste de los modelos a los datos de la muestra.

Los modelos han sido linealizados mediante la transformación de la variable dependiente o de la independiente o de ambas. Cuando se ajusta el modelo lineal, en primer lugar se transforman los datos, después se ajusta el modelo y finalmente se invierte la transformación para mostrar los resultados.

Además de utilizar la regresión lineal simple, también se ha utilizado la regresión múltiple. La diferencia entre ellas radica en que el procedimiento de regresión múltiple está basado en la construcción de un modelo estadístico describiendo el impacto de dos o más factores (características geométricas) sobre una variable dependiente (velocidad o tasa de deceleración/aceleración).

Para la comparación de modelos con diferente número de variables se ha recurrido al coeficiente R^2 ajustado, que muestra el estadístico R^2 ajustado por el número de coeficientes incluidos en el modelo.

Finalmente, en los casos en los que con los dos procedimientos descritos no se han obtenido buenos resultados, se ha recurrido a la regresión no lineal. El proceso de

calibración de estos modelos se basa en el ajuste de los coeficientes de una función especificada a priori, que relaciona una sola variable dependiente con una o más variables independientes, utilizando cuadrados mínimos no lineales.

A la hora de comparar modelos lineales con modelos no lineales, debe considerarse no sólo el estadístico R^2 sino también el comportamiento de los modelos, ya que el R^2 de la regresión no lineal no se corresponde exactamente con el R^2 de la regresión lineal.

Una vez calibrados diferentes modelos para cada una de las variables se han seleccionado, para formar parte del modelo de construcción del perfil de velocidad de operación, aquellos que mejor ajuste presentan, no sólo a los datos de la muestra, a partir de los que han sido calibrados, sino también al fenómeno que describen. Además, se ha tenido en cuenta también la sencillez y la aplicabilidad de los modelos en diferentes configuraciones.

6.3.3. Estudio de la influencia de las características del conductor, del viaje y del tipo de vehículo

En el presente trabajo de investigación, no sólo se ha considerado la influencia de las variables geométricas del trazado en la velocidad en rectas y en curvas y en las tasas de deceleración y aceleración, sino que también se ha tenido en cuenta la influencia de otros factores, como son las características del conductor, del viaje que realiza y del tipo de vehículo que conduce. Este análisis puede sentar las bases del diseño de programas de seguridad vial, campañas de concienciación y programas de educación.

El estudio se ha dividido en dos partes: la variable elegida y la variable desarrollada por los conductores. Esta variable será, según el caso, la velocidad desarrollada en rectas, la velocidad mínima en curvas, la tasa de deceleración o la tasa de aceleración.

En el análisis de la variable elegida por los conductores se han incluido únicamente como variables independientes las características del conductor, las del viaje que realiza y el tipo de vehículo que conduce. Mientras que al evaluar la variable desarrollada por los conductores se han incluido también parámetros que describen la geometría del elemento por el que circulan y el tramo en el que se encuentra este elemento.

En lugar de realizar un estudio individual de cada una de las variables, se ha llevado a cabo un análisis multivariable, con el fin de no confundir los efectos producidos con cada una de las variables, por la posible relación existente entre ellas. Por ejemplo, la velocidad observada para mujeres puede ser mayor que la observada para los hombres, pero esto puede reflejar la circunstancia accidental de que las mujeres observadas tiendan a ser más jóvenes que los hombres. Por lo que, las velocidades más altas pueden atribuirse más a la edad que al género del conductor. Esta confusión puede evitarse mediante el análisis citado.

De esta forma, se ha abordado el estudio de las diferencias en el comportamiento en la conducción entre los distintos tipos de usuarios. Debido a la relación entre

velocidad y siniestralidad, puede constituirse una buena aproximación a sus diferencias en cuanto a siniestralidad, o, más bien, de las actitudes del conductor frente al riesgo.

7. DESARROLLO

Con base en la metodología descrita en el apartado anterior, se ha llevado a cabo el desarrollo del presente trabajo de investigación. A continuación, se profundiza en cada una de las etapas que lo componen y que han permitido la consecución del objetivo principal: la caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales a partir de la observación naturalística de la evolución de vehículos ligeros.

7.1. TOMA DE DATOS

En el presente apartado se describe como se llevaron a cabo las diferentes jornadas de toma de datos. En primer lugar, se recogen los trabajos previos a la toma de datos que es necesario realizar antes de cada una de las jornadas. A continuación, se describe el procedimiento que se llevó a cabo en la prueba piloto y las incidencias que surgieron. Estas incidencias permitieron mejorar la metodología de toma de datos que se implantó en las siguientes jornadas, en las que se recopilaban los datos necesarios para proceder con las siguientes etapas de la investigación. Un resumen de estos datos se muestra en el presente apartado.

Finalmente, se describen los trabajos posteriores a la toma de datos que debe realizarse tras la finalización de cada una de las jornadas.

7.1.1. Trabajos previos a las jornadas de toma de datos

Antes de llevar a cabo las campañas de toma de datos, un equipo se desplazó a los tramos seleccionados con el fin de realizar una serie de tareas previas a las jornadas que deben realizarse en campo:

- estudiar la IMD de los tramos para realizar, en función de esta, el reparto de los dispositivos GPS entre los dos puntos de control
- estudiar las zonas en las que instalar los controles de entrega y recogida de los GPS para concretar su disposición
- medir las dimensiones representativas de los distintos tramos, así como también las secciones de las zonas en las que se ubicarán los controles el día de las pruebas

Adicionalmente, en las jornadas 1 y 2, correspondientes a la prueba piloto, al estudiar el posible condicionamiento mediante grabaciones de video, es necesario realizar dos tareas más:

- seleccionar los puntos de ubicación de las cámaras y dibujar las marcas en el pavimento como referencias para la utilización del programa de restitución de trayectorias y obtención de velocidades
- grabar durante un cierto tiempo las secciones que el día de las pruebas se grabarán, con el fin de poder evaluar la posible variación que se produce en la conducción

Además de las actividades de campo citadas, es necesario llevar a cabo una preparación de la prueba en gabinete, realizando las siguientes tareas:

- diseñar, maquetar e imprimir los trípticos informativos que se entregarán a los conductores (ver anexo I)
- elaboración de los identificadores del personal
- elaboración de los formularios con las preguntas a realizar a los conductores (ver anexo II)
- elaboración de los estadillos en los que anotar las respuestas (ver anexo III)
- elaboración de una ficha resumen de las preguntas a realizar a los conductores, plastificada para evitar deterioros
- preparación de las carpetas con la documentación necesaria para cada encargado, incluyendo: estadillos para anotación de datos, ficha con las preguntas, bolígrafo, los números de teléfono de todos los participantes y una copia de la autorización de la DGT
- carga de las baterías de las cámaras de video
- configuración y vaciado de la memoria de los dispositivos GPS y colocación de las pilas. Las pilas se instalarán la noche anterior para evitar problemas de carga y, por tanto, de toma de datos
- organización del plan de trabajo a seguir y distribución de personal
- reparto del material de cada control al responsable del mismo

Los trabajos previos necesarios para la toma de datos son similares para todas las jornadas.

7.1.2. Prueba piloto

Con el fin de detectar las posibles incidencias que puedan producirse en las pruebas a realizar dentro del trabajo de investigación, se llevó a cabo una prueba piloto en dos tramos de una carretera convencional de la Comunidad Valenciana siguiendo las directrices descritas en el Diseño Experimental. Ambos tramos pertenecen a la CV-245. El primero está limitado por una glorieta al norte del municipio de Casinos y por el municipio de Alcublas. El segundo tramo está limitado por los municipios de Alcublas y Altura.

En ella, se ha implantado el procedimiento a seguir en las siguientes pruebas, de forma que, a partir de los resultados obtenidos, sea posible establecer nuevos criterios en función de las dificultades que se hayan presentado.

A continuación, se describen las dos jornadas de toma de datos y las modificaciones que a partir de ellas se realizaron al diseño experimental.

7.1.2.1. Jornada de toma de datos CV-245 [Glorieta Casinos – Alcublas]

Localización

El primer tramo en el que se ha llevado a cabo la toma de datos es el comprendido entre la glorieta intersección entre la CV-245 y la CV-339 y el municipio de Alcublas, con una longitud de 8.1 km.



Figura 7.1 Situación del tramo CV-245 [Glorieta Casinos – Alcublas]

Este tramo se caracteriza por una gran variedad de elementos de trazado, tanto en planta como en alzado, así como también por una baja intensidad de tráfico. Estas dos características son óptimas para la prueba piloto ya que la baja intensidad de tráfico permite la implantación del procedimiento experimental sin grandes problemas y la especial geometría del tramo permite evaluar la funcionalidad de la aplicación informática desarrollada.

Condiciones meteorológicas

La toma de datos se realizó el miércoles 5 de marzo de 2008, desde las 8:42 h hasta las 13:32 h en el tramo Glorieta Casinos – Alcublas.

En este periodo de tiempo las temperaturas se mantuvieron por debajo de los 15° en todo momento: en el control situado en la glorieta la temperatura al inicio de las pruebas era 5° y al final 15°; en el control ubicado en el entorno del municipio de Alcublas estas temperaturas fueron de 5° y 13°.

Finalmente, es importante señalar en este apartado el fuerte viento de componente norte que estuvo presente durante toda la prueba alcanzando velocidades de hasta 90 km/h.

Ubicaciones de los controles

Para el desarrollo de la toma de datos se establecieron dos controles, uno al inicio y uno al final del tramo.

Control 1: glorieta intersección CV-245 con CV-339

El primer control se ubicó en el extremo del abocinamiento del ramal de la glorieta que se dirige al municipio de Alcublas, aprovechando las marcas viales del mismo. Para su señalización, se distribuyeron una serie de conos a lo largo de la línea de limitación del abocinamiento y se colocaron las señales de peligro correspondientes. De esta forma, en la zona delimitada por los conos se situó el personal encargado de la entrega y recogida de los dispositivos GPS, dejando espacio suficiente para la circulación de los vehículos.

Las dimensiones de la sección AA' son 6.10 m de calzada y 6.90 m de plataforma, mientras que la sección BB' tiene 11.12 m de la zona que incluye carriles y cebreado, y 12.10 m al incluir los arcenes, manteniendo un carril de 3.50 m.



Figura 7.2 Control 1. CV-245 [Glorieta Casinos – Alcublas]

Control 2: Alcublas sur

El segundo control del tramo Glorieta-Alcublas se ubicó en la entrada de este municipio, aprovechando el espacio adicional de una parada de autobús existente. Los conos necesarios para la delimitación del control se dispusieron en el centro de la calzada dejando en su interior suficiente espacio para las personas destinadas allí y en el exterior suficiente ancho de carril para la circulación de vehículos.

En la sección CC' hay un ancho de calzada de 6.40 m, que al incluir la zona de parada de autobús aumenta a 8.15 m.



Figura 7.3 Control 2. CV-245 [Glorieta Casinos – Alcublas]

Ubicación de las cámaras

Como se ha justificado en el apartado de metodología, es necesaria la ubicación de dos cámaras en cada tramo de estudio para estudiar el carácter naturalístico de la observación, comparando las velocidades obtenidas de los videos un día anterior a la jornada de toma de datos con las obtenidas el día de la jornada de datos cuando los vehículos van equipados con los dispositivos GPS.

Las cámaras se ubicaron de forma que fueran lo menos perceptibles posible para los conductores, ocultándolas entre los árboles de la zona.

Para la restitución de trayectorias a partir de grabaciones de video y la posterior obtención de la velocidad puntual del vehículo analizado, es necesario disponer de cuatro referencias separadas entre sí una distancia conocida. Estas cuatro referencias se han materializado en campo mediante cuatro marcas pintadas en el pavimento dispuestas según se muestra en la figura 7.4.



Figura 7.4 Marcas en el pavimento para el estudio del carácter naturalístico de la observación



Figura 7.5 Secuencia captada por el video para el control de la velocidad

La medición de las velocidades puntuales se ha llevado a cabo en dos puntos intermedios del tramo: en una sección que permita una circulación lo suficientemente libre (tramo recto) y en una sección que suponga un control de la velocidad (tramo

curvo de radio intermedio). Estas secciones deben estar próximas para que una sola persona pueda encargarse del cambio de cinta y batería de dos cámaras. Una vez la cámara está preparada, el encargado de ellas debe distanciarse del lugar para, sin perder de vista ninguna de ellas, no ser visto por los conductores ya que podría influir en su comportamiento.

Para la definición de los lugares en los que ubicar las cámaras y el marcaje de las referencias ha sido necesario desplazarse al lugar con anterioridad al día de la prueba. De esta forma, se obtiene también una estimación de la IMD del tramo de estudio.



Figura 7.6 Tramos de control de velocidad del tramo Glorieta – Alcublas

Las zonas elegidas se encuentran en los alrededores del PK 13+000 de la CV-245. Las dimensiones de su sección son 6.35 m de calzada y 7 m de plataforma.

Desarrollo de la toma de datos

Instalación de controles y ubicación del personal

Antes de proceder a la entrega de los dispositivos GPS es necesario tener instalados, al menos, los dos controles de uno de los tramos. Por ello, para comenzar las pruebas a las 8:30 h, con el fin de captar el mayor número de vehículos posible, el personal, tanto de la UPV como de conservación cedidos por la Conselleria de Infraestructuras y Transporte, tuvieron que desplazarse a la zona a las 7:30 h.

El punto de encuentro fue la glorieta donde se instaló el primer control. A continuación, se instaló el control de Alcublas sur según las disposiciones indicadas en el apartado correspondiente.



Figura 7.7 Instalación del control glorieta



Figura 7.8 Instalación del control Alcublas sur

A cada control se destinaron 4 personas, 3 de la UPV y un operario de Conselleria, con las siguientes funciones:

- 1 persona de la UPV detenía a los vehículos que se aproximaban al control mediante una señal de mano y tomaba los datos del conductor, de los ocupantes y del vehículo que no precisan una pregunta directa a los mismos (Ver anexo II).
- 1 persona de la UPV se encargaba de explicar a los conductores el motivo del estudio, pedir su colaboración, entregarles el GPS correspondiente y tomarles una serie de datos (ver anexo II).



Figura 7.9 Entrega del GPS

- El operario de Conselleria se encargaba de parar los vehículos que se dirigían al control dotados con el GPS que les habían entregado en el control opuesto.
- 1 persona de la UPV hacía las preguntas finales a los conductores, referentes a su percepción de la carretera y de la conducción que habían realizado. Por último, les entregaba un tríptico resumen del proyecto de investigación REVEL (ver anexo I).



Figura 7.10 Encuestando a los conductores

Al encontrarse en la carretera, todo el personal iba debidamente identificado con chalecos reflectantes y gorras con el logotipo de la UPV y con los correspondientes identificadores.

Asimismo, se destinó una persona a cada control de velocidad con cámaras, encargadas de cambiar las cintas y las baterías cuando fuera necesario. Esta persona debe mantenerse oculta para influir lo mínimo posible en el comportamiento de los conductores por lo que no llevará chaleco reflectante.

Desarrollo de la toma de datos

Una vez instalados los dos controles de un mismo tramo, se comienza la entrega de los GPS siguiendo las indicaciones que se muestran en el anexo II y que han sido revisadas por el INTRAS, al igual que las preguntas formuladas a la recogida de los dispositivos.

Al tramo Glorieta-Alcublas (8 km) se le asignaron 30 dispositivos GPS mientras que al tramo Alcublas-Altura (20 km) tan sólo 18. Esta diferencia se debe a que la IMD en el primer tramo es muy superior a la observada en el segundo. De hecho, a pesar de que el tramo Alcublas-Altura es mucho más largo que el anterior, en ningún momento hubo escasez de rastreadores en los controles. Sin embargo, en los controles del tramo Glorieta-Alcublas llegaron, debido a la desigualdad de IMD entre los dos sentidos de circulación, a tener únicamente 1 GPS, por lo que uno de los coordinadores tuvo que llevar dispositivos de un control a otro en una ocasión.

En este mismo tramo hubo momentos en los que no se cumplió la premisa de flujo libre. Esto fue debido a que, en el control de entrega de GPS, se acumularon entre 5

y 6 vehículos y la persona encargada de entregar los GPS y realizar una pequeña encuesta, para evitar el nerviosismo de los conductores, agilizó la tarea y los fue enviando al otro control con un intervalo inferior a 2 minutos.

En el control Glorieta se detectaron algunas maniobras de los conductores para evitar el control que, en algunos casos, pueden poner en peligro la seguridad vial.

La primera maniobra anómala detectada fue la llevada a cabo por un conductor que, tras dirigirse claramente hacia el control, en el último momento tomó la decisión de realizar un cambio de sentido en lugar de seguir su recorrido inicial (ver figura 7.11). Al realizar este cambio de trayectoria tan brusca podría haber puesto en peligro a un vehículo que circulara detrás de él.



Figura 7.11 Maniobra anómala 1

Otra maniobra anómala detectada, más peligrosa que la anterior, la realizó un conductor que, con el fin de evitar el control, se incorporó al ramal con destino Alcublas en sentido contrario de circulación (ver figura 7.12). Esta maniobra supuso un riesgo de colisión frontal con los vehículos que circulaban con dirección Alcublas-Glorieta y de atropello de las personas encargadas de la recogida de los GPS.



Figura 7.12 Maniobra anómala 2

Finalmente, cabe destacar la alta colaboración de los conductores y, por supuesto, que no se ha extraviado ningún dispositivo. Con todo ello, se ha obtenido una muestra de 72 recorridos glorieta – Alcablas y 74 recorridos en sentido Alcablas – glorieta.

7.1.2.2. Jornada de toma de datos CV-245 [Alcablas – Altura]

Localización

El segundo tramo de la prueba piloto se corresponde al tramo de la CV-245 comprendido entre el municipio de Alcablas y Altura con una longitud de 20.2 km.

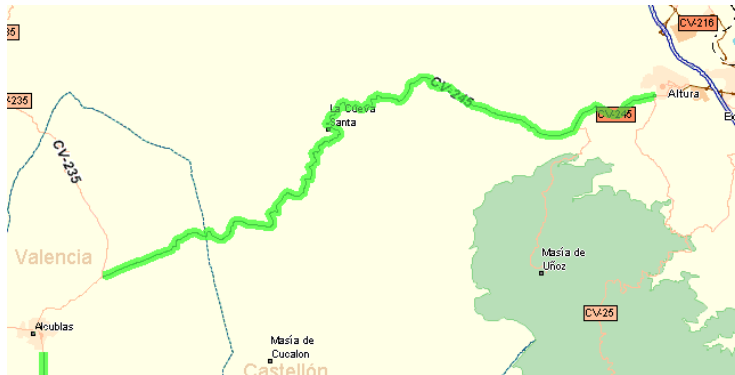


Figura 7.13 Situación del tramo CV-245 [Alcablas – Altura]

Este tramo, al igual que el anterior, se caracteriza por una gran variedad de elementos de trazado, tanto en planta como en alzado, así como también por una baja intensidad de tráfico. Como se ha citado anteriormente, estas dos características son óptimas para la prueba piloto ya que la baja intensidad de tráfico permite la implantación del procedimiento experimental sin grandes problemas y la

especial geometría del tramo permite evaluar la funcionalidad de la aplicación informática desarrollada.

Condiciones meteorológicas

La prueba piloto se realizó el miércoles 5 de marzo de 2008, desde las 9:21 h hasta las 14:16 h en el tramo Alcublas-Altura. En este tramo se tomaron datos durante más tiempo de lo establecido inicialmente debido a la baja IMD existente.

En este periodo de tiempo las temperaturas se mantuvieron por debajo de los 13° en todo momento: en el control ubicado en el entorno del municipio de Alcublas las temperaturas fueron de 5° y 13°; y en el control de Altura se registraron las temperaturas más bajas (0° en el inicio y 13° al final de las pruebas).

Finalmente, es importante señalar en este apartado el fuerte viento de componente norte que estuvo presente durante toda la prueba alcanzando velocidades de hasta 90 km/h.

Ubicación de los controles

Para el desarrollo de la toma de datos se establecieron dos controles, uno al inicio y uno al final del tramo.

Control 1: Alcublas norte

El primer control del tramo Alcublas-Altura se decidió ubicarlo en la intersección con la CV-235 con dirección a Sacañet, y no en la entrada de Alcublas ya que por esta intersección podía haber entrada y salida de vehículos que afectaran a la prueba. Además, en esta ubicación hay suficiente espacio para la señalización y delimitación de la zona de control y para la circulación de vehículos a ambos lados de esta.

En la sección DD', la vía presenta unas dimensiones de 6.20m de calzada y 6.90 m de plataforma.



Figura 7.14 Control 1. CV-245 [Alcublas – Altura]

Control 2: Altura

El último control se ha ubicado en la glorieta situada a la entrada este del municipio de altura. Al tratarse de una glorieta, la disposición del control se ha realizado de forma similar a la del control 1 del tramo glorieta - Alcublas.

En la sección EE' la vía tiene un ancho de 10.35 m sin incluir arcenes y 11.25 m incluyéndolos. Los carriles en esta sección miden 4.10 m de ancho.

En la sección la vía tiene unas dimensiones de 6.35 m de ancho de calzada y 7 m de plataforma.



Figura 7.15 Control 2. CV-245 [Alcublas – Altura]

Ubicación de las cámaras

Al igual que en el anterior, las cámaras de control de velocidades de este tramo fueron situadas estratégicamente para la obtención de la grabación de la circulación en una recta y una curva consecutivas, siguiendo criterios similares a los descritos. No obstante, en este caso la zona curva tiene un radio mucho menor que el anterior por lo que el efecto de control de velocidad aumenta.

Las zonas elegidas se encuentran en los alrededores del PK 23+100 de la CV-245. Las dimensiones de su sección son 5.95 m de calzada y 6.65 m de plataforma.



Figura 7.16 Tramos de control de velocidad del tramo Alcublas – Altura

Desarrollo de la toma de datos

Instalación de controles y ubicación del personal

Tras instalar los controles del tramo Glorieta - Alcublas se procedió a la instalación de los correspondientes al tramo Alcublas-Altura.

Para la instalación del control de Alcublas norte se optó por ubicarlo próximo a una intersección, donde se contaba con espacio suficiente para colocar la isleta de conos de protección del personal permitiendo la circulación.





Figura 7.17 Instalación del control Alcublas norte

El control de Altura se instaló en la glorieta de entrada a la población siguiendo los mismos criterios que en el control de la glorieta del tramo Glorieta - Alcublas.



Figura 7.18 Instalación del control de Altura

La distribución de personal en los distintos controles fue similar a la descrita para los controles del tramo Glorieta - Alcublas.

Desarrollo de la toma de datos

Una vez instalados los dos controles del tramo, se comienza la entrega de los GPS siguiendo las indicaciones que se muestran en el anexo II y que han sido revisadas por el INTRAS, al igual que las preguntas formuladas a la recogida de los dispositivos.

Como se ha citado anteriormente, al tramo Alcublas-Altura (20.2 km) se le asignaron tan sólo 18, debido a su baja IMD. Con estos GPS fue suficiente y en ningún momento hubo escasez de dispositivos en ninguno de los controles.

En el tramo Alcublas-Altura hay accesos intermedios por los que se incorporaban vehículos a la vía principal, aunque, gracias a la baja IMD de la carretera el flujo libre no se vio comprometido por este motivo. Sin embargo, la circulación sí que se vio condicionada por la presencia de vehículos pesados procedentes de una cantera próxima.

Finalmente, cabe destacar la alta colaboración de los conductores y que no se ha extraviado ningún dispositivo. Con todo ello, se ha obtenido una muestra de 22 recorridos Alcublas – Altura y 23 recorridos en sentido Altura – Alcublas.

7.1.2.3. Resultados de la comprobación del carácter naturalístico de la toma de datos

Como se ha justificado en el apartado de metodología, es necesaria la ubicación de dos cámaras en cada tramo de estudio para estudiar el carácter naturalístico de la toma de datos, comparando las velocidades obtenidas de los videos un día anterior a la jornada de toma de datos (26/02/2008) con las obtenidas el día de la jornada de toma de datos (05/03/2008) cuando los vehículos van equipados con los dispositivos GPS.

Las cámaras se ubicaron de forma que fueran lo menos perceptibles posible para los conductores, ocultándolas entre los árboles de la zona. En cada uno de los tramos, se situó una cámara en una sección recta donde no hubiera grandes limitaciones de velocidad y otra en una sección curva los conductores tuvieran que conducir a una velocidad limitada.

Tras la restitución de las trayectorias a partir de las grabaciones de video y la posterior obtención de la velocidad de los vehículos analizados, se compararon los datos obtenidos un día anterior a la prueba con los obtenidos el día de la toma de datos con GPS para cada una de las cuatro secciones. Los resultados fueron los siguientes.

Tramo CV-245 Dirección: Glorieta Casinos – Alcublas

Sección curva

Tras realizar la comparación de medias de las muestras obtenidas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008, se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 7.1.

The TTEST Procedure						
Variable: velocidad_curv_cs_alc (velocidad_curv_cs_alc)						
control_ curv_cs_ alc	N	Media	Dev std	Err std	Mínimo	Máximo
d26	31	59.9698	10.0486	1.8048	39.0337	81.7412
d5	35	57.7643	10.1688	1.7188	38.3867	76.3516
Diff (1-2)		2.2055	10.1126	2.4941		
control_ curv_cs_ alc	Método	Media	95% CL Media	Dev std	95% CL Dev std	
d26		59.9698	56.2839 63.6556	10.0486	8.0299 13.4316	
d5		57.7643	54.2712 61.2574	10.1688	8.2253 13.3232	
Diff (1-2)	Combinada	2.2055	-2.7771 7.1881	10.1126	8.6239 12.2275	
Diff (1-2)	Satterthwaite	2.2055	-2.7747 7.1856			
	Método	Varianzas	DF	Valor t	Pr > t	
	Combinada	Igual	64	0.88	0.3799	
	Satterthwaite	Unequal	63.215	0.88	0.3796	
Igualdad de varianzas						
	Método	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F	
	Folded F	34	30	1.02	0.9528	

Tabla 7.1 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la curva del tramo Glorieta Casinos – Alcublas

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que, con una F de 1.02 con una significación de $0.9528 > 0.05$, las varianzas se pueden suponer iguales. Por este motivo, mediante el contraste de medias con varianzas iguales, un t-valor de 0.88 con 64 grados de libertad y una significación de $0.3799 > 0.05$, las medias se pueden considerar iguales; o lo que es lo mismo, no hay diferencias significativas entre las velocidades registradas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008.

Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, (-2.7771, 7.1881), al que pertenece el 0, las medias se pueden considerar iguales y, por tanto, ninguna es mayor.

Sección recta

Tras realizar la comparación de medias de las muestras obtenidas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008, se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 7.2.

The TTEST Procedure

Variable: **velocidad_rec_cs_alc** (velocidad_rec_cs_alc)

control_ rec_cs_alc	N	Media	Dev std	Err std	Mínimo	Máximo
d26	48	48.7436	10.0054	1.4442	28.1183	79.2000
d5	53	44.9694	10.2750	1.4114	15.6832	68.8696
Diff (1-2)		3.7742	10.1479	2.0220		

control_ rec_cs_alc	Método	Media	95% CL Media	Dev std	95% CL Dev std
d26		48.7436	45.8384 51.6489	10.0054	8.3292 12.5326
d5		44.9694	42.1373 47.8016	10.2750	8.6243 12.7129
Diff (1-2)	Combinada	3.7742	-0.2379 7.7862	10.1479	8.9099 11.7885
Diff (1-2)	Satterthwaite	3.7742	-0.2328 7.7812		

Método	Varianzas	DF	Valor t	Pr > t
Combinada	Igual	99	1.87	0.0649
Satterthwaite	Unequal	98.467	1.87	0.0646

Igualdad de varianzas

Método	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
Folded F	52	47	1.05	0.8564

Tabla 7.2 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la recta del tramo Glorieta Casinos – Alcablas

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que, con una F de 1.05 con una significación de $0.8564 > 0.05$, las varianzas se pueden suponer iguales. Por este motivo, mediante el contraste de medias con varianzas iguales, un t-valor de 1.87 con 99 grados de libertad y una significación de $0.0649 > 0.05$, las medias se pueden considerar iguales; o lo que es lo mismo, no hay diferencias significativas entre las velocidades registradas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008.

Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, (-0.2379, 7.7862), al que pertenece el 0, las medias se pueden considerar iguales y, por tanto, ninguna es mayor.

Tramo CV-245 Dirección: Alcablas – Glorieta Casinos

Sección curva

Tras realizar la comparación de medias de las muestras obtenidas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008, se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 7.3.

The TTEST Procedure

Variable: velocidad_curv_alc_cs (velocidad_curv_alc_cs)

control_ curv_alc_ cs	N	Media	Dev std	Err std	Mínimo	Máximo
d26	21	57.6183	16.9269	3.6937	30.8800	89.0769
d5	23	55.2642	11.2628	2.3485	29.3165	78.9545
Diff (1-2)		2.3541	14.2437	4.2991		

control_ curv_alc_ cs	Método	Media	95% CL Media	Dev std	95% CL Dev std
d26		57.6183	49.9133 65.3233	16.9269	12.9501 24.4436
d5		55.2642	50.3938 60.1346	11.2628	8.7106 15.9408
Diff (1-2)	Combinada	2.3541	-6.3218 11.0300	14.2437	11.7445 18.1039
Diff (1-2)	Satterthwaite	2.3541	-6.5380 11.2463		

Método	Varianzas	DF	Valor t	Pr > t
Combinada	Igual	42	0.55	0.5869
Satterthwaite	Unequal	34.337	0.54	0.5942

Igualdad de varianzas

Método	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
Folded F	20	22	2.26	0.0662

Tabla 7.3 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la curva del tramo Alcublas – Glorieta Casinos

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que, con una F de 2.26 con una significación de $0.0662 > 0.05$, las varianzas se pueden suponer iguales. Por este motivo, mediante el contraste de medias con varianzas iguales, un t-valor de 0.55 con 42 grados de libertad y una significación de $0.5869 > 0.05$, las medias se pueden considerar iguales; o lo que es lo mismo, no hay diferencias significativas entre las velocidades registradas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008.

Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, (-6.3218, 11.0300), al que pertenece el 0, las medias se pueden considerar iguales y, por tanto, ninguna es mayor.

Sección recta

Tras realizar la comparación de medias de las muestras obtenidas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008, se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 7.4.

The TTEST Procedure

Variable: *velocidad_rec_alc_cs* (*velocidad_rec_alc_cs*)

<i>control_rec_alc_cs</i>	N	Media	Dev std	Err std	Mínimo	Máximo
d26	36	53.7334	12.7937	2.1323	28.8000	88.0000
d5	67	53.1670	10.0807	1.2315	26.6966	76.6452
Diff (1-2)		0.5664	11.0962	2.2930		

<i>control_rec_alc_cs</i>	Método	Media	95% CL Media	Dev std	95% CL Dev std
d26		53.7334	49.4046 58.0621	12.7937	10.3767 16.6885
d5		53.1670	50.7081 55.6259	10.0807	8.6153 12.1502
Diff (1-2)	Combinada	0.5664	-3.9823 5.1151	11.0962	9.7543 12.8695
Diff (1-2)	Satterthwaite	0.5664	-4.3612 5.4940		

Método	Varianzas	DF	Valor t	Pr > t
Combinada	Igual	101	0.25	0.8054
Satterthwaite	Unequal	58.778	0.23	0.8189

Igualdad de varianzas

Método	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
Folded F	35	66	1.61	0.0956

Tabla 7.4 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la recta del tramo Alcablas – Glorieta Casinos

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que, con una F de 1.61 con una significación de $0.0956 > 0.05$, las varianzas se pueden suponer iguales. Por este motivo, mediante el contraste de medias con varianzas iguales, un t-valor de 0.25 con 101 grados de libertad y una significación de $0.8054 > 0.05$, las medias se pueden considerar iguales; o lo que es lo mismo, no hay diferencias significativas entre las velocidades registradas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008.

Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, (-3.9823, 5.1151), al que pertenece el 0, las medias se pueden considerar iguales y, por tanto, ninguna es mayor.

Tramo CV-245 Dirección: Alcablas – Altura

Sección curva

Tras realizar la comparación de medias de las muestras obtenidas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008, se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 7.5.

The TTEST Procedure

Variable: velocidad_curv_alc_ait (velocidad_curv_alc_ait)

control_ curv_alc_ ait	N	Media	Dev std	Err std	Mínimo	Máximo
d26	7	52.0505	9.7455	3.6835	41.1124	66.8077
d5	15	50.5789	7.5753	1.9559	38.1758	66.8077
Diff (1-2)		1.4717	8.2863	3.7929		

control_ curv_alc_ ait	Método	Media	95% CL Media	Dev std	95% CL Dev std
d26		52.0505	43.0374 61.0636	9.7455	6.2799 21.4602
d5		50.5789	46.3838 54.7739	7.5753	5.5461 11.9470
Diff (1-2)	Combinada	1.4717	-6.4403 9.3836	8.2863	6.3395 11.9659
Diff (1-2)	Satterthwaite	1.4717	-7.8826 10.8259		

Método	Varianzas	DF	Valor t	Pr > t
Combinada	Igual	20	0.39	0.7021
Satterthwaite	Unequal	9.5357	0.35	0.7319

Igualdad de varianzas				
Método	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
Folded F	6	14	1.66	0.4094

Tabla 7.5 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la curva del tramo Alcublas – Altura

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que, con una F de 1.66 con una significación de $0.4094 > 0.05$, las varianzas se pueden suponer iguales. Por este motivo, mediante el contraste de medias con varianzas iguales, un t-valor de 0.39 con 20 grados de libertad y una significación de $0.7021 > 0.05$, las medias se pueden considerar iguales; o lo que es lo mismo, no hay diferencias significativas entre las velocidades registradas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008.

Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, (-6.4403, 9.3836), al que pertenece el 0, las medias se pueden considerar iguales y, por tanto, ninguna es mayor.

Sección recta

Tras realizar la comparación de medias de las muestras obtenidas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008, se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 7.6.

The TTEST Procedure

Variable: *velocidad_rec_alc_alt* (*velocidad_rec_alc_alt*)

<i>control_rec_alc_alt</i>	N	Media	Dev std	Err std	Mínimo	Máximo
d26	7	67.6657	12.6692	4.7885	53.4462	86.8500
d5	15	65.7525	9.8479	2.5427	49.6286	86.8500
Diff (1-2)		1.9132	10.7721	4.9308		

<i>control_rec_alc_alt</i>	Método	Media	95% CL Media	Dev std	95% CL Dev std
d26		67.6657	55.9487 79.3827	12.6692	8.1639 27.8983
d5		65.7525	60.2989 71.2061	9.8479	7.2099 15.5311
Diff (1-2)	Combinada	1.9132	-8.3723 12.1987	10.7721	8.2413 15.5557
Diff (1-2)	Satterthwaite	1.9132	-10.2474 14.0737		

Método	Varianzas	DF	Valor t	Pr > t
Combinada	Igual	20	0.39	0.7021
Satterthwaite	Unequal	9.5357	0.35	0.7319

Igualdad de varianzas

Método	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
Folded F	6	14	1.66	0.4094

Tabla 7.6 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la recta del tramo Alcublas – Altura

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que, con una F de 1.66 con una significación de $0.4094 > 0.05$, las varianzas se pueden suponer iguales. Por este motivo, mediante el contraste de medias con varianzas iguales, un t-valor de 0.39 con 20 grados de libertad y una significación de $0.7021 > 0.05$, las medias se pueden considerar iguales; o lo que es lo mismo, no hay diferencias significativas entre las velocidades registradas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008.

Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, (-8.3723, 12.1987), al que pertenece el 0, las medias se pueden considerar iguales y, por tanto, ninguna es mayor.

Tramo CV-245 Dirección: Altura – Alcublas

Sección curva

Tras realizar la comparación de medias de las muestras obtenidas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008, se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 7.7.

The TTEST Procedure

Variable: **velocidad_curv_ait_alc** (velocidad_curv_ait_alc)

control_ curv_ait_ alc	N	Media	Dev std	Err std	Mínimo	Máximo
d26	6	42.0211	8.2715	3.3768	29.6923	53.4462
d5	17	48.5919	9.0057	2.1842	35.6308	66.8077
Diff (1-2)		-6.5708	8.8364	4.1960		

control_ curv_ait_ alc	Método	Media	95% CL Media	Dev std	95% CL Dev std
d26		42.0211	33.3407 50.7015	8.2715	5.1631 20.2867
d5		48.5919	43.9616 53.2221	9.0057	6.7071 13.7060
Diff (1-2)	Combinada	-6.5708	-15.2969 2.1553	8.8364	6.7983 12.6278
Diff (1-2)	Satterthwaite	-6.5708	-15.5908 2.4493		

Método	Varianzas	DF	Valor t	Pr > t
Combinada	Igual	21	-1.57	0.1323
Satterthwaite	Unequal	9.5373	-1.63	0.1348

Igualdad de varianzas

Método	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
Folded F	16	5	1.19	0.9230

Tabla 7.7 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la curva del tramo Altura – Alcublas

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que, con una F de 1.19 con una significación de $0.9230 > 0.05$, las varianzas se pueden suponer iguales. Por este motivo, mediante el contraste de medias con varianzas iguales, un t-valor de -1.57 con 21 grados de libertad y una significación de $0.1323 > 0.05$, las medias se pueden considerar iguales; o lo que es lo mismo, no hay diferencias significativas entre las velocidades registradas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008.

Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, (-15.296, 2.1553), al que pertenece el 0, las medias se pueden considerar iguales y, por tanto, ninguna es mayor.

Sección recta

Tras realizar la comparación de medias de las muestras obtenidas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008, se han obtenido los resultados que se muestran en la tabla 7.8.

The TTEST Procedure

Variable: **velocidad_rec_alt_alc** (velocidad_rec_alt_alc)

control_ rec_alt_ alc	N	Media	Dev std	Err std	Mínimo	Máximo
d26	6	54.6274	10.7529	4.3899	38.6000	69.4800
d5	17	63.1694	11.7074	2.8394	46.3200	86.8500
Diff (1-2)		-8.5420	11.4873	5.4548		

control_ rec_alt_ alc	Método	Media	95% CL Media	Dev std	95% CL Dev std
d26		54.6274	43.3429 65.9119	10.7529	6.7120 26.3727
d5		63.1694	57.1501 69.1888	11.7074	8.7193 17.8178
Diff (1-2)	Combinada	-8.5420	-19.8860 2.8019	11.4873	8.8378 16.4161
Diff (1-2)	Satterthwaite	-8.5420	-20.2680 3.1840		

Método	Varianzas	DF	Valor t	Pr > t
Combinada	Igual	21	-1.57	0.1323
Satterthwaite	Unequal	9.5373	-1.63	0.1348

Igualdad de varianzas

Método	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
Folded F	16	5	1.19	0.9230

Tabla 7.8 Resultados obtenidos tras la comparación de medias para la recta del tramo Altura – Alcublas

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que, con una F de 1.19 con una significación de $0.9230 > 0.05$, las varianzas se pueden suponer iguales. Por este motivo, mediante el contraste de medias con varianzas iguales, un t-valor de -1.57 con 21 grados de libertad y una significación de $0.1323 > 0.05$, las medias se pueden considerar iguales; o lo que es lo mismo, no hay diferencias significativas entre las velocidades registradas el día 26/02/2008 y el día 05/03/2008.

Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, (-19.886, 2.8019), al que pertenece el 0, las medias se pueden considerar iguales y, por tanto, ninguna es mayor.

Resumen de los resultados obtenidos

Tras la comparación de los datos obtenidos antes y durante la toma de datos, en secciones rectas y curvas de los dos tramos de la prueba piloto, se puede concluir que no hay diferencias estadísticas entre ellos. Por tanto, la metodología propuesta para la toma de datos de velocidad no influye en el comportamiento de los conductores. Por tanto, queda comprobado el carácter naturalístico de la observación de la evolución de los vehículos siguiendo la metodología de toma de datos descrita.

7.1.2.4. Modificaciones del diseño experimental tras la prueba piloto

Las pruebas piloto se llevaron a cabo con el fin de detectar las posibles incidencias que puedan producirse en las pruebas a realizar dentro del trabajo de investigación. Consistieron en la toma de datos en dos tramos de una carretera convencional de la Comunidad Valenciana siguiendo las directrices descritas en el diseño experimental.

En ella, se ha implantado el procedimiento a seguir en las siguientes pruebas, de forma que, a partir de los resultados obtenidos, sea posible establecer nuevos criterios en función de las dificultades que se hayan presentado.

A continuación, se describen las incidencias que se presentaron durante esta toma de datos y las posibles soluciones para las pruebas siguientes.

Escasez de GPS en uno de los controles

Al tramo Glorieta Casinos - Alcublas (8 km) se le asignaron 30 dispositivos GPS mientras que al tramo Alcublas - Altura (20 km) tan sólo 18. Esta diferencia se debe a que la IMD en el primer tramo es muy superior a la observada en el segundo. De hecho, a pesar de que el tramo Alcublas-Altura es mucho más largo que el anterior, en ningún momento hubo escasez de rastreadores en los controles. Sin embargo, en los controles del tramo Glorieta-Alcublas llegaron, debido a la desigualdad de IMD entre los dos sentidos de circulación, a tener únicamente 1 GPS, por lo que uno de los coordinadores tuvo que llevar dispositivos de un control a otro en una ocasión. Esta operación se demoró demasiado por lo que para las siguientes pruebas, especialmente en vías con una IMD más alta, se recomienda disponer de un vehículo en cada control, ya que mientras dos personas de la UPV se mantienen en su posición y realizan el trabajo de la tercera, esta puede llevar a cabo el intercambio de GPS, suponiendo esta operación menos tiempo que si se recurre al coordinador, sobre todo en zonas sin cobertura telefónica.

Además de la anterior recomendación, que no puede ser llevada a cabo en todos los casos, se propone una solución adicional: cuando el número de GPS en un punto de control aumenta excesivamente (con lo que se espera que en el otro punto de control el número de GPS sea muy reducido) es posible enviar dos GPS en cada vehículo, hasta volver a alcanzar una posición de equilibrio.

A pesar de que esta opción es válida, es posible que se produzca alguna incidencia que provoque la ausencia de una de las personas del control de entrega de los GPS (en el inicialmente debería haber 2 personas), además de la necesidad de llevar GPS al otro control. Por ello, a partir de la toma de datos piloto se realizó una modificación de los formularios con el fin de poder llevar a cabo la toma de datos con tan sólo dos personas (una en el puesto de entrega y otra en el de recogida) y con el apoyo de uno de los operarios de conservación que tan sólo tomaría datos simples como la matrícula y el modelo de vehículo del conductor al que se le entrega el GPS. A partir de ese día se utilizaron los formularios modificados por suponer una mayor rapidez y flexibilidad en las tareas desarrolladas por el personal.

Acumulación de vehículos en el control de entrega

En el tramo Glorieta Casinos - Alcublas hubo momentos en los que no se cumplió la premisa de flujo libre. Esto fue debido a que, en el control de entrega de GPS, se acumularon entre 5 y 6 vehículos y la persona encargada de entregar los GPS y realizar una pequeña encuesta, para evitar el nerviosismo de los conductores, agilizó la tarea y los fue enviando al otro control con un intervalo inferior a 2 minutos. Cuando se presente esta circunstancia será preferible dejar pasar a uno o dos vehículos sin GPS y continuar con los siguientes.

Maniobras peligrosas

En el control Glorieta del tramo Glorieta Casinos – Alcablas se detectaron algunas maniobras de los conductores para evitar el control que, en algunos casos, pueden poner en peligro la seguridad vial.

Una de las maniobras detectadas fue la llevada a cabo por un conductor que, tras dirigirse claramente hacia el control, en el último momento tomó la decisión de realizar un cambio de sentido en lugar de seguir su recorrido inicial. Al realizar este cambio de trayectoria tan brusca podría haber puesto en peligro a un vehículo que circulara detrás de él y al personal encargado de la toma de datos.

Por ello, es necesario extremar las precauciones en las campañas de toma de datos futuras. Una opción es que, cuando el control se ubique próximo a una glorieta, el personal del control de recogida de GPS se sitúe lo más próximos posible a la corona de la glorieta.

Datos no válidos

A pesar de que el funcionamiento de la metodología de toma de datos fue adecuado a las previsiones establecidas, esta prueba piloto no se ha considerado como las jornadas de toma de datos 1 y 2, ya que en la toma de datos entre Alcablas y Altura la muestra obtenida ha sido insuficiente y en la toma de datos entre la glorieta de Casinos y Alcablas, aunque la muestra pudiera parecer en principio suficiente, tras eliminar los datos anómalos y los vehículos condicionados por otros, se constató que la muestra era inferior a la deseada (alrededor de 75 observaciones por sentido).

Además, los datos pueden considerarse no válidos para el estudio de la velocidad de operación debido al fuerte viento de componente norte que estuvo presente durante toda la prueba, alcanzando velocidades de hasta 90 km/h.

En las siguientes pruebas, si las condiciones meteorológicas no son las adecuadas para el estudio antes del montaje de los controles, se considerará la opción de posponer la toma de datos a pesar de la demora de tipo administrativo (autorizaciones) que puede producirse.

7.1.3. Campaña de toma de datos

Con base en la experiencia de la prueba piloto y según los resultados obtenidos en ella, se llevaron a cabo 10 jornadas de toma de datos en 10 tramos de carretera convencional de la Comunidad Valenciana.

7.1.3.1. Localización y características de los tramos de estudio

Siguiendo los criterios marcados en el apartado de metodología respecto a las características básicas que deben cumplir los tramos de carretera en los que se lleve a cabo la toma de datos, se seleccionaron 10 tramos de carretera convencional pertenecientes a la provincia de Valencia. En la figura 7.19 se muestra la localización de los tramos seleccionados.

Todos ellos son tramos de carretera convencional de un carril por sentido de circulación, sin intersecciones significativas, es decir que no aportan un flujo de tráfico considerable a la zona de toma de datos.

La velocidad límite genérica es en todos ellos de 90 km/h, ya que, salvo en zonas muy localizadas, el ancho de los arcenes no llega a 1.50 metros. De hecho, en varios tramos el ancho del arcén es inferior a 0.5 metros o se ha reconvertido a carril bici.

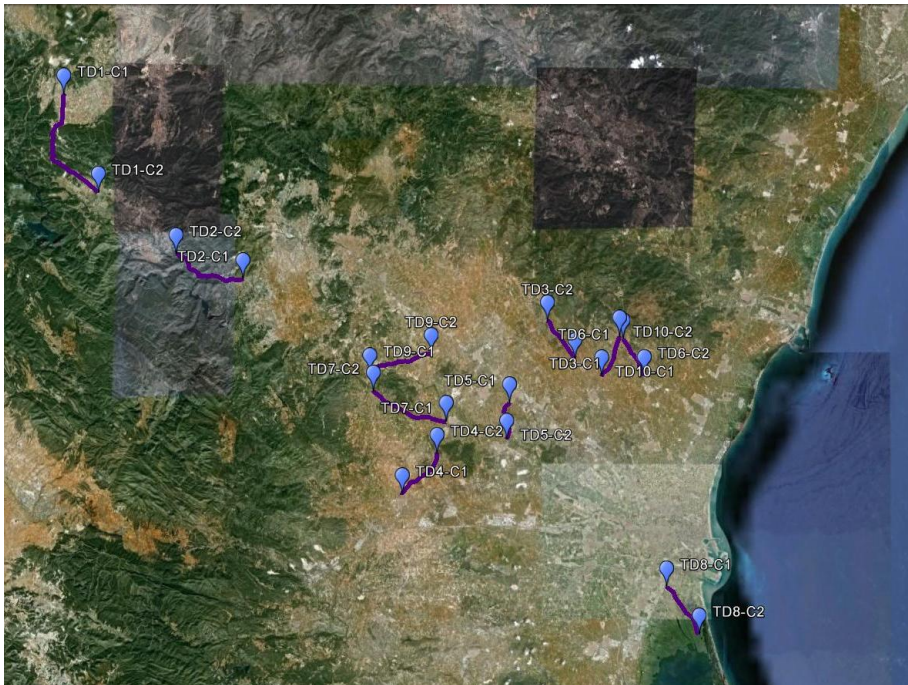


Figura 7.19 Localización de los tramos de toma de datos

En la tabla 7.9 se presentan las características básicas de los tramos donde se ha realizado la toma de datos.

Nº	Carretera	Inicio	Final	IMD estimada (vh/día)	% Pesados	Long. (Km)
1	CV-35	Tuéjar	Titaguas	860		13.4
2	CV-35	Losa del Obispo	Calles	2257	8.00%	8.2
3	CV-333	Urb. Brugar	Urb. Pedravilla	2419	3.00%	5.1
4	CV-50	Cheste	Villamarchante	4852	11.00%	5.7
5	CV-372	La Pobla de Vallbona	Ribarroja del Turia	4149	2.60%	4.5
6	CV-305	Rutas (CV-315)	Náquera (CV-310)	6086	3.94%	4.4
7	CV-370	Vilamarchante	Pedralba (CV-381)	2523	6.54%	8.3

8	CV-401	Alfajar	Carretera del Saler	5292	1.93%	6
9	CV-376	Pedralba	Llíria	2656	5.00%	6.7
10	CV-310	Bétera	CV-305	6809	3.69%	4.7

Tabla 7.9 Características básicas de los tramos de toma de datos

En ella se puede observar la diferencia de intensidad de vehículos y de porcentaje de pesados entre los distintos tramos. Estos datos han sido proporcionados por las administraciones que poseen la titularidad de cada una de las carreteras. Son los correspondientes al año 2007, ya que la toma de datos se realizó en 2008.

Los cuatro primeros tramos pertenecen a carreteras gestionadas por la Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente, mientras que el resto pertenecen a la Diputación de Valencia.

7.1.3.2. Desarrollo de la toma de datos

El procedimiento seguido en cada una de las jornadas de toma de datos es similar al descrito para la prueba piloto, por lo que en el presente apartado únicamente se presenta un resumen de las mismas. La descripción completa de las distintas jornadas de toma de datos se muestra en el anexo IV.

En la tabla 7.10 se muestra un resumen de las jornadas de toma de datos.

Nº	Fecha	Carretera	% Colab.	Muestra ida	Muestra vuelta	Vh-km	Acum Vh-km
1	16/04/2008	CV-35	95%	75	90	2211	2211
2	29/05/2008	CV-35	95%	121	120	1976.2	4187.2
3	04/06/2008	CV-333	80%	101	89	969	5156.2
4	12/06/2008	CV-50	98%	116	96	1208.4	6364.6
5	16/06/2008	CV-372	90%	77	117	873	7237.6
6	17/06/2008	CV-305	85%	112	105	954.8	8192.4
7	19/06/2008	CV-370	85%	61	79	1162	9354.4
8	20/06/2008	CV-401	98%	102	91	1158	10512.4
9	23/06/2008	CV-376	98%	58	53	743.7	11256.1
10	26/06/2008	CV-310	98%	74	58	620.4	11876.5

Tabla 7.10 Resumen de las jornadas de toma de datos

Las jornadas de toma de datos se llevaron a cabo durante el horario de mañana, en días laborables entre abril y junio de 2008. Se eligió este periodo de tiempo con el fin de que los datos se correspondieran con el tráfico habitual de cada uno de los tramos, sin influencia de periodos de hora punta o festivos. Asimismo, se realizaron

en primavera para evitar, en la medida de lo posible, condiciones meteorológicas que pudieran influir en el comportamiento de los conductores. Aún así, varias de las jornadas organizadas tuvieron que aplazarse por presencia de lluvia.

En todas ellas hay que destacar la alta colaboración de los conductores que permitió obtener muestras de vehículos que llegaron a 120 vehículos en el tramo 2. Teniendo en cuenta el número de vehículos de los que se tomó datos en cada una de las jornadas y la longitud de los tramos, finalmente se obtuvo una muestra de casi 12000 vh·km.

Sin embargo, también hay que hacer referencia a la baja muestra observada en los tramos 9 y 10 debido a la presencia de diferentes medios de comunicación, que difundieron la toma de datos de la investigación llevada a cabo por la Universitat Politècnica de València. En la parte final de la etapa de tratamiento de datos se comprobará si esta muestra es suficientemente significativa, en función de la dispersión que se presente.

7.1.4. Trabajos posteriores a las jornadas de toma de datos

Al finalizar cada toma de datos se procede a la retirada de las pilas para evitar la descarga innecesaria de las mismas. Posteriormente, para la descarga de los datos de los GPS al ordenador y su preparación para la siguiente jornada únicamente se utiliza dos pilas nuevas para todos los dispositivos.

Una vez descargados los datos es necesario proceder a su tratamiento con los algoritmos desarrollados a tal efecto (se verá en los apartados siguientes).

Por otra parte, hay que transcribir a ordenador y codificar los datos tomados en los formularios al hablar con los conductores que han colaborado con el estudio. Dichos formularios se recogen en el anexo III. Para el estudio de estos datos es necesario organizarlos de forma adecuada ya que la mayor parte de los parámetros son cualitativos por lo que para incorporarlos al estudio es necesario darles un tratamiento especial previo.

En principio, los datos de que se dispone tras las jornadas de toma de datos son:

- Control entrega:
 - Datos del recorrido:
 - Sentido.
 - Hora de inicio.
 - Datos del conductor y del viaje realizado por él:
 - Sexo.
 - Edad y años conduciendo.
 - Kilómetros recorridos en un año.
 - Origen y destino del viaje.
 - Frecuencia del viaje: diferenciando si es habitual o no.
 - Motivo del viaje: diferenciando si es por motivos laborales o no.
 - Datos de los ocupantes: número de niños, adultos y ancianos que acompañan al conductor.

- Datos del vehículo:
 - Marca y modelo.
 - Matrícula.
- Control recogida:
 - Datos de la percepción del recorrido por parte del conductor:
 - Condicionamiento y motivos.
 - Conocimiento del límite genérico de velocidad.
 - Opinión sobre el límite: si considera que es adecuado y por qué.
 - Percepción de si las señales de tráfico, y especialmente las de los límites de velocidad, se encuentran visibles.
 - Velocidad media que el conductor considera que ha desarrollado en el tramo recorrido.

Los datos del recorrido como la hora de inicio y el sentido de circulación son imprescindibles para su identificación y la diferenciación entre unos recorridos y otros. Estos datos permitirán, en un futuro, evaluar la influencia de las diferentes variables en la elección de la velocidad por parte de los conductores en cada una de las secciones de la carretera.

El resto de los datos de las encuestas realizadas en el control de entrega no se rellenaron para la totalidad de los conductores, debido generalmente a la inquietud de algunos de los participantes. A pesar de ello, el porcentaje de conductores de los que sí se obtuvieron datos es bastante elevado, como puede comprobarse en la tabla 7.11.

Nº	muestra GPS	muestra encuesta	%
1	165	128	77.5
2	241	228	94.6
3	190	179	94.2
4	212	200	94.3
5	194	179	92.2
6	217	208	95.8
7	140	129	92.1
8	193	182	94.3
9	111	104	93.7
10	132	126	95.5

Tabla 7.11 Porcentaje de conductores participantes en las encuestas

Finalmente, respecto a los datos obtenidos en el control de recogida de GPS, hay que decir que no se han considerado en las fases posteriores de la investigación debido a la heterogeneidad de las respuestas, en muchos casos poco fiables.

7.2. TRATAMIENTO DE DATOS

Después de llevar a cabo las 10 campañas de toma de datos descritas, se dispone de una gran cantidad de datos. Por una parte, los datos almacenados en los dispositivos GPS hacen posible la obtención de perfiles continuos de velocidad individuales y la restitución de la geometría de la vía. Por otra, a partir de las encuestas se han obtenido datos sobre las características sociológicas de los conductores, del viaje que están realizando y del vehículo que conducen.

Sin embargo, sin una adecuada depuración y tratamiento de estos datos, su utilización para el estudio del comportamiento de los conductores no es posible. Por ello, tras la toma de datos, la siguiente etapa consiste en el tratamiento de los datos obtenidos. Esta fase se divide en dos, debido a las diferentes características de los datos procedentes de las encuestas y de los datos almacenados por los dispositivos GPS.

7.2.1. Tratamiento de los datos de las encuestas

Tras la realización de las diferentes pruebas se tiene una gran cantidad de encuestas realizadas a los conductores. Como se ha visto en el apartado correspondiente, los datos procedentes de las encuestas se dividen en cinco grandes grupos: datos del recorrido, datos del conductor y del viaje realizado por él, datos de los ocupantes, datos del vehículo y datos de percepción del recorrido por parte del conductor.

Los datos procedentes del último grupo no se van a considerar en las siguientes fases de la investigación debido al pequeño número de conductores que han contestado a las preguntas y a la ambigüedad y heterogeneidad de las respuestas, además de la poca fiabilidad de muchas de ellas.

Por tanto, los datos brutos de los que se dispone para cada conductor son los siguientes:

- Datos del recorrido:
 - Tramo de carretera.
 - Sentido.
 - Hora de inicio.
- Datos del conductor y del viaje realizado por él:
 - Sexo.
 - Edad.
 - Años conduciendo.
 - Kilómetros recorridos en un año.
 - Origen y destino del viaje.
 - Frecuencia del viaje: diferenciando si es habitual o no.
 - Motivo del viaje: diferenciando si es por motivos laborales o no.
- Datos de los ocupantes: número de niños, adultos y ancianos que acompañan al conductor.
- Datos del vehículo:
 - Marca y modelo.

- Matrícula.

El primer paso en el tratamiento de los datos de las encuestas consiste en la identificación de cada uno de los conductores. Para ello, se utilizan los datos del recorrido. Con ellos se codifica cada uno de los conductores mediante una serie de caracteres, separados por guiones. El primer grupo de caracteres es una "P" seguida de un número del 1 al 10, indicando la prueba de la que se trata. A continuación, en el código aparece una "V", indicando que los siguientes parámetros corresponden al vehículo. A la V le sigue el número del GPS, variando de 00 a 49. Después se escribe una "I" si se trata del recorrido de ida y una "V" si es el de vuelta. El código termina con un número que indica de qué número de trayecto se trata. Así, el código "P_1_V_00_I_1" se corresponde con el vehículo que en la primera campaña de toma de datos llevaba el GPS 00 en el primer recorrido de ida de ese GPS.

Codificando de esta forma las trayectorias y perfiles obtenidos del tratamiento de datos procedentes de los GPS, es fácil hacer la correspondencia de estos con los datos de las encuestas.

El siguiente paso es emparejar el resto de los datos con el código del conductor correspondiente. Para ello, hay que tener en cuenta que muchos de los datos anteriormente presentados tienen un carácter marcadamente cualitativo. Además, otros, como los kilómetros recorridos en un año, en principio cuantitativos se convierten en cualitativos con respuestas como "muchos" o "pocos". Por tanto, es necesario estudiar conductor a conductor y dato a dato para establecer un código para cada variable.

Datos del conductor

Son los datos más importantes para identificar los patrones de comportamiento, por lo que su caracterización debe ser cuidadosamente estudiada.

El sexo del conductor se ha codificado como una variable dicotómica, 1 si se trata de un hombre y 0 si se trata de una mujer.

La edad y los años de experiencia en la conducción se han mantenido como variable cuantitativa. Sin embargo, como se verá en el análisis, se irán realizando grupos según los resultados de los análisis estadísticos.

Los kilómetros recorridos en el último año, debido a la alta casuística en las contestaciones como se ha citado anteriormente, se ha convertido en una variable cualitativa, en la que se ha distinguido entre "muchos" cuando el número de kilómetros es superior a 20000 o la respuesta ha sido muchos o similar, "medio" cuando el número de kilómetros se encuentra entre 5001 y 19999 o la respuesta indica que puede encontrarse en este intervalo, y "pocos" cuando el número de kilómetros sea menor de 5000 o el conductor así lo haya indicado.

Datos del viaje

Los datos referentes al viaje son de los factores más influyentes en la forma de conducir. Para un mismo conductor, puede existir una gran diferencia entre la forma de conducir en un viaje largo y en uno corto. Del mismo modo, el conocimiento de la

carretera sobre la que se circula es fundamental en la elección de la velocidad. Por ello, lo importante no es conocer el origen y el destino del viaje, sino su longitud y si se trata de un trayecto habitual o no.

Los datos de origen y destino se han utilizado para el análisis del trayecto completo, diferenciando entre recorridos cortos (menos de 30 km), medios (entre 30 y 100 km) y largos (más de 100 km). También se distinguen los conductores que realizan rutas de reparto, ya que al ser su trabajo la forma de conducir puede ser claramente diferente al resto, no influenciada por la longitud del recorrido total del viaje.

Otros dos factores relacionados con el viaje que influyen en la velocidad desarrollada por los conductores es si se trata de un trayecto habitual y el motivo del mismo. Estas dos variables se han convertido en variables dicotómicas. Así, la variable habitual valdrá 1 si el viaje lo es y 0 si no, y la variable laboral valdrá 1 si es este el motivo del viaje y 0 si no lo es.

Datos de los ocupantes

El número de pasajeros y si estos son niños, adultos o ancianos puede tener una influencia determinante en la elección de la velocidad. Por ello, se han definido tres variables (niños, adultos y ancianos) y el valor de cada una de ellas se corresponderá con el número de ocupantes de la edad correspondiente, sin contabilizar el conductor.

Los umbrales de edad para la consideración de uno u otro tipo de pasajero son orientativos, ya que el registro de estos datos se realizó tras una inspección visual. Así, se considera niño a un pasajero menor de 18 años, anciano cuando es mayor de 65 y adulto cuando su edad se encuentra entre estos dos valores.

Datos del vehículo

El objetivo de la encuesta en este ámbito era el registro de la marca, modelo y matrícula de cada vehículo.

Con los datos de matrícula se podría, en investigaciones posteriores, conocer los historiales de accidentes y de sanciones de los conductores asociados, así como también los datos de la ficha técnica del vehículo, y relacionar estos datos con su perfil de velocidad. El inconveniente es que estos datos no están disponibles, por lo que dependerá de la administración competente y de la normativa aplicable que puedan ser estudiados o no.

Con el registro de la marca y el modelo de cada vehículo se pretendía poder identificarlos con sus características aproximadas. Sin embargo, en muchos casos el encuestador únicamente reflejó el tipo de vehículo y, por tanto, esta es la única variable que puede considerarse en el estudio. La clasificación ha sido: turismo, todoterreno, monovolumen, furgoneta y camioneta, referida al camión con masa máxima autorizada inferior a 3500 kg. La codificación para la incorporación de esta variable en el análisis fue: (1) camioneta, (2) furgoneta, (3) monovolumen, (4) todoterreno y (5) turismo. En el apartado correspondiente se detallará cómo se ha considerado esta variable en el análisis.

7.2.2. Tratamiento de los datos procedentes de los GPS

El desarrollo básico de las pruebas experimentales ha consistido en la toma de datos de posición, gracias a los dispositivos GPS, de una muestra suficientemente amplia de vehículos circulando por distintos tramos de carretera.

Los datos recogidos por el rastreador GPS se presentan en formato Latitud-Longitud-Altitud-Rumbo-Hora-Fecha-Velocidad. Para los fines de la investigación, se precisa una conversión a coordenadas (x,y) locales, así como también llevar a cabo una serie de procesos de depuración y tratamiento de datos con el fin de obtener las trayectorias individuales de cada vehículo. A partir de ellas, se estimará la geometría de cada uno de los tramos y, utilizando también los datos de tiempo de los GPS, se calcularán los perfiles continuos de velocidad individuales y de los distintos percentiles. Los perfiles de velocidad no estarán basados en los datos de velocidad proporcionados por los GPS, sino que serán obtenidos a partir de los datos de posición y tiempo, con el fin de aumentar la precisión.

Todo ello gracias a que el software específico de los GPS permite exportar los datos en formato texto. Estos archivos en formato texto son importados a Excel, donde se han desarrollado una serie de macros que permiten llevar a cabo el gran número de cálculos necesarios.

7.2.2.1. Depuración inicial de los datos brutos de los GPS

Como ya se ha comentado, los GPS almacenan datos de Latitud-Longitud-Altitud-Rumbo-Hora-Fecha-Velocidad con una cadencia de 1 segundo. Por tanto, los datos iniciales, a partir de los cuales se llevarán a cabo las siguientes etapas de la investigación, consisten en una serie de datos almacenados cada segundo para cada tramo por cada GPS.

En ocasiones, los listados de datos pueden contener algún error. Por ello, es necesario revisar previamente el listado de puntos, buscando que los intervalos de tiempo entre un punto y el siguiente sean los correctos, es decir, que no haya saltos.

Los errores más frecuentes se deben a que es posible que el GPS reciba más información en un instante de la que es capaz de procesar, por lo que almacena los datos en una memoria temporal para procesar los nuevos que va registrando. Posteriormente, cuando el nivel de datos desciende, el dispositivo recupera el dato anterior y lo almacena. De esta forma, se producen pequeñas alteraciones en el orden habitual de los datos.

Otro error posible en los aparatos utilizados es la falta de uno de los datos, dando lugar a que entre dos puntos la velocidad almacenada sea anormalmente alta. En nuestro caso, al no utilizar la velocidad calculada por el GPS, este error puede parecer irrelevante pero es indicador de errores también en los datos de posición, que si son utilizados.

La frecuencia de aparición de este tipo de errores es mínima y su detección y corrección sencillas. Por ello, es recomendable llevar a cabo siempre este tipo de depuración de datos antes de pasar a las siguientes etapas, que en caso de mantener estos errores podrían dar resultados erróneos.

7.2.2.2. Transformación de coordenadas

Los dispositivos GPS almacenan la posición de los vehículos cada segundo mediante datos de longitud y latitud. Con el fin de disponer de estos datos en coordenadas (x,y) locales que faciliten el tratamiento de datos posterior, es necesario realizar una transformación de coordenadas.

Para ello, el primer paso es seleccionar el punto que servirá de referencia para la transformación de coordenadas. Es recomendable que este punto se corresponda aproximadamente con el inicio del tramo a estudiar. En algunas ocasiones el punto seleccionado "P" corresponde a un tramo adyacente ya analizado y, por tanto, ya tiene unas coordenadas asignadas que es recomendable mantener (x_p, y_p).

Para la conversión de coordenadas desde latitud y longitud es necesario llevar a cabo la transformación cartográfica basada en el empleo de una esfera de radio el radio medio de la Tierra en la latitud aproximada de España. Este radio ha sido calculado empleando un elipsoide con ejes los radios en los Polos y en el Ecuador, dando como resultado el valor de 6,369,452 metros.

La transformación se realiza en dos fases. En primer lugar se determinan las coordenadas locales del punto inicial y posteriormente se transforman el resto de puntos del tramo.

La latitud y longitud del origen (coordenadas (0,0) en el plano local) se obtienen a partir las ecuaciones 52 y 53, según el esquema de la figura 7.20.

$$Lat_0 = Lat_p - \frac{y_p}{R_T} \quad (52)$$

$$Long_0 = Long_p - \frac{x_p}{R_T \cdot \cos Lat_p} \quad (53)$$

Donde:

$Lat_0, Long_0$: latitud y longitud del punto (0,0) del plano local

$Lat_p, Long_p$: latitud y longitud del punto que se ha marcado como referencia

y_p, x_p : coordenadas x e y del punto "P" (m)

R_T : radio de la Tierra (m)

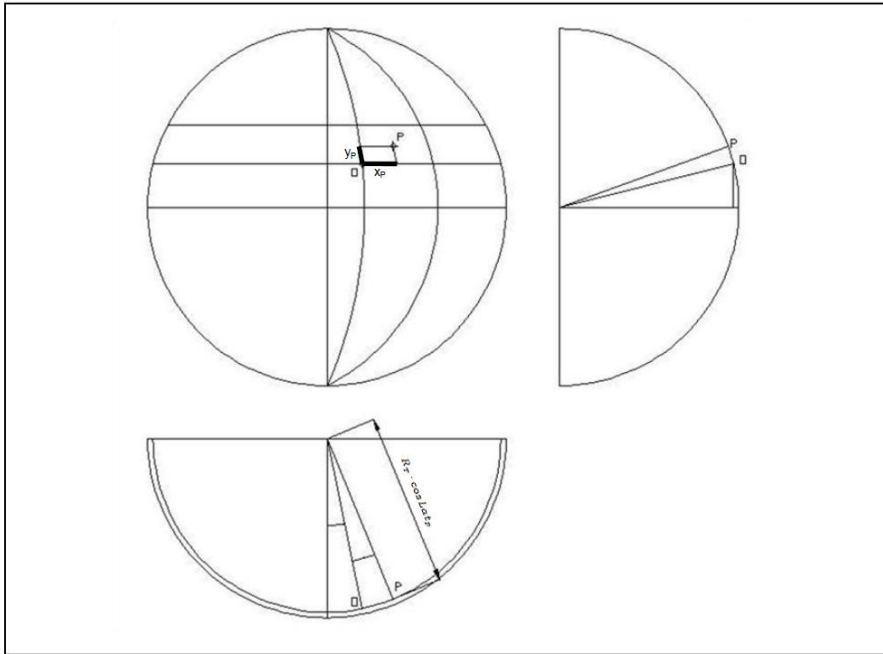


Figura 7.20 Esquema del cambio del sistema de coordenadas al plano local

Mediante estas expresiones se obtiene la latitud y longitud del punto (0,0) en el plano local para el cálculo del resto de puntos. Ahora resta transformar el resto de puntos para adaptarlos al plano local. Para ello, se aplica la transformación dada por las ecuaciones 54 y 55.

$$x_i = \left(\frac{\pi}{180} \cdot Long_i - Long_0 \right) \cdot R_T \cdot \cos \left(Lat_i \cdot \frac{\pi}{180} \right) \quad (54)$$

$$y_i = \left(\frac{\pi}{180} \cdot Lat_i - Lat_0 \right) \cdot R_T \quad (55)$$

Donde, además de las variables mostradas anteriormente:

x_i, y_i : coordenadas x, y en el plano local de cada punto (m)

$Lat_i, Long_i$: latitud y longitud de cada punto

De esta forma, tras este paso se dispone de todos los datos de posición almacenados en el GPS en coordenadas locales.

7.2.2.3. Obtención de las trayectorias individuales

Hasta este momento, se dispone de todos los datos proporcionados por los GPS en coordenadas locales. Pero los GPS proporcionan los datos del recorrido consecutivo total, por lo que hay que identificar los segmentos correspondientes a los tramos de carretera de toma de datos y diferenciar las trayectorias por vehículos, así como eliminar los datos no válidos.

Por ello, el siguiente paso es identificar los puntos inicio y final de cada trayectoria. Para ello, se identifica un punto que se encuentre en el entorno del inicio del tramo y un punto que se encuentre próximo al final del tramo. No es necesario que se corresponda exactamente con ningún punto de ninguna trayectoria.

Asimismo, es necesario indicar un vector director en el punto de partida y otro en el final, que indican la dirección que sigue la trayectoria. El sentido de este vector es en la dirección del recorrido del tramo, es decir, en el tramo de ida, el vector inicial y final presentarán el sentido de ida, mientras que en el recorrido de vuelta ambos llevarán el sentido de vuelta. Estos vectores se identifican con dos puntos, que tampoco tienen por qué pertenecer a la lista de datos, sino que es suficiente con señalar unos valores aproximados.

Además, hay que indicar un valor del radio del círculo que se creará alrededor del punto inicial o final con el objetivo de seleccionar los puntos de la lista de datos que se encuentren cerca de ellos.

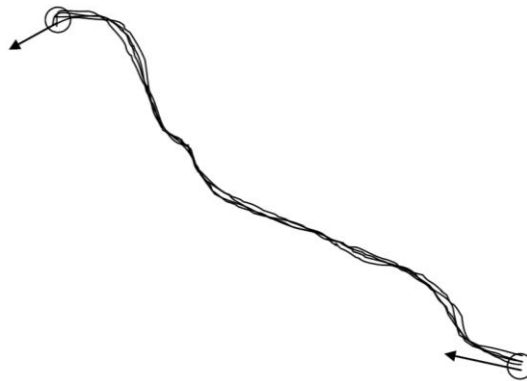


Figura 7.21 Esquema de los vectores inicio y final de un tramo, además de los radios asociados

A partir de estos datos se identifican los puntos pertenecientes a cada uno de los tramos de entre todos los puntos disponibles, con el objetivo de trabajar únicamente sobre los tramos netos de recorrido. Este proceso se divide en dos partes. En primer lugar es necesario buscar los puntos cercanos a los puntos de inicio y final aproximados de los tramos para, posteriormente, determinar el punto inicial y final definitivos de cada tramo.

La primera parte del proceso consiste en trazar un círculo “imaginario”, de radio el valor indicado anteriormente, alrededor de cada punto considerado como inicio o final.

El valor asignado al radio es determinante para la obtención de buenos resultados. Se recomienda emplear un valor próximo a 25 metros, ya que valores muy pequeños pueden dar lugar a que no se marque ningún punto debido a que la distancia con el punto más próximo sea superior al valor del radio.

La búsqueda de los puntos que se encuentran dentro del círculo “imaginario” se centra básicamente en evaluar las distancias entre cada punto y los puntos de

origen y de final indicados. En caso de que la distancia sea inferior al radio, el punto se marca como perteneciente al círculo. Por lo que en este momento ya se dispone de una serie de puntos próximos al inicio y al final del tramo, para cada una de las trayectorias. Estos puntos forman segmentos intermedios de las trayectorias individuales.

Una vez se ha determinado los puntos que pueden pertenecer a los extremos, se procede a la determinación del inicio y final del tramo de estudio. De esta forma se pretende unificar el origen y el final del tramo para todas las trayectorias individuales.

En primer lugar, para cada uno de los recorridos individuales, se determina la ecuación de la recta ($y=mx+n$) que pasa por el primer y el segundo punto de la secuencia correspondiente.

A continuación, se obtiene la ecuación de la recta perpendicular al vector director que pasa por el punto extremo (inicial o final) definido inicialmente ($y=m'x+n'$). Para ello, se calcula en primer lugar la recta que pasa por el punto extremo y que lleva la dirección del vector director y, posteriormente, se calcula la recta perpendicular que pasa por él.

Para cada trayectoria individual, se obtendrá el punto intersección de la recta perpendicular anterior con el segmento correspondiente, dando como resultado un punto colineal con los dos del recorrido analizado. Este punto se considerará el extremo de esa trayectoria si se encuentra dentro del segmento delimitado por los dos puntos anteriores. En caso de que no se encuentre dentro del citado segmento, se avanzará un punto y se repetirá el proceso.

En la figura 7.22 se observa un esquema de la obtención del punto inicial de cada trayectoria, con el punto inicial y el vector director en azul.

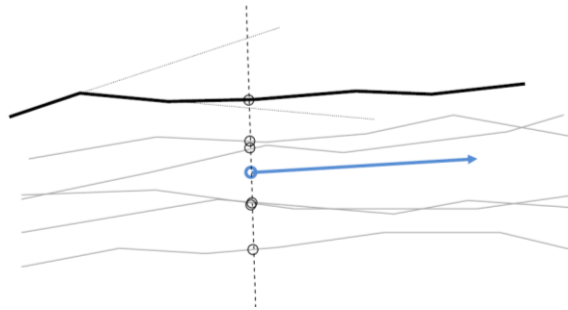


Figura 7.22 Esquema de obtención del punto inicial de cada trayectoria

Los puntos extremos obtenidos únicamente están definidos por sus coordenadas locales, por lo que será necesario interpolar los datos de tiempo y altitud entre los puntos adyacentes correspondientes.

Llevando a cabo este proceso en ambos extremos del tramo de estudio para cada una de las trayectorias individuales y eliminando los datos externos, se dispone de los tramos claramente diferenciados.

7.2.2.4. Restitución de la geometría en planta

Como resultado de los anteriores procedimientos, a partir de una trayectoria completa se han detectado todos los tramos individuales, eliminando los puntos fuera de ellos. En este apartado se mostrará cómo obtener una única trayectoria promedio a partir de todas las individuales anteriores. Esta trayectoria media servirá de base para la estimación de la geometría del trazado de la carretera.

Antes de comenzar con el proceso de obtención de la trayectoria media es necesario revisar gráficamente cada una de las trayectorias individuales, con el fin de descartar del análisis aquellas que a simple vista presentan un comportamiento errático. Esta situación puede ocurrir cuando un vehículo equipado con el GPS sale del tramo de carretera de estudio en alguna intersección intermedia para, posteriormente, volver a incorporarse.

Obtención de la trayectoria media

El proceso para la obtención de la trayectoria media se basa en la utilización de cada uno de los tramos de ida y de vuelta anteriormente obtenidos y depurados, con el objetivo de determinar unos nuevos puntos que configuren la trayectoria que más se aproxime a todas las trayectorias individuales.

Para ello, inicialmente se planteó la posibilidad de utilizar ajustes de splines cúbicos entre los puntos de las diferentes trayectorias para, de este modo, obtener una trayectoria media más exacta. Sin embargo, debido a la proximidad de los puntos tomados, y basándose en los primeros resultados obtenidos, no se hace necesario ajustar mediante splines. Un tratamiento por este método únicamente conseguiría aumentar excesivamente el tiempo de cálculo.

Con el proceso que se describe a continuación permite, además, eliminar los puntos anómalos.

La situación inicial de este procedimiento y el objetivo que se pretende alcanzar puede observarse en la figura 7.23, donde se representan las distintas trayectorias individuales y la trayectoria única final con un grosor mayor.



Figura 7.23 Esquema de la situación inicial y final de la obtención de trayectoria media

Los datos de partida para llevar a cabo el proceso desarrollado son:

- Secuencia de puntos de cada una de las trayectorias individuales en los dos sentidos de circulación.
- Intervalo de confianza que define el rango de datos válidos para cada punto (definido por el usuario, adoptando un 95 % por defecto).

- Distancia δ entre los diferentes puntos resultado de la trayectoria media (definida por el usuario).
- Ancho de la calzada. Al realizar los cálculos con todo el conjunto de trayectorias se minimiza el error de posicionamiento que puedan llevar asociado los dispositivos GPS. Con el dato de ancho de calzada, tras la obtención de la trayectoria media, se podrá restituir el centro de cada carril directamente, calculando la perpendicular a la trayectoria media.

A partir de estos datos, el proceso para la obtención de la trayectoria media sigue la siguiente secuencia:

1. Identificación de todos los recorridos individuales que pertenecen al tramo que se está analizando, con sus correspondientes puntos inicio y final. Los puntos inicio de todas las trayectorias son colineales al proceder de la intersección de la perpendicular al vector director inicial con cada una de ellas. Lo mismo ocurre con los puntos finales.
2. Obtención del punto medio de los puntos iniciales de las trayectorias de un sentido de circulación. El mismo procedimiento se realiza para las trayectorias del sentido opuesto. En este proceso se eliminan los puntos que exceden cierto intervalo de confianza fijado anteriormente. En la figura 7.24 se observa cómo se obtiene el punto medio, para cada carril, a partir de los puntos iniciales de cada trayectoria. En rojo se representa el punto eliminado por exceder el intervalo de confianza fijado.

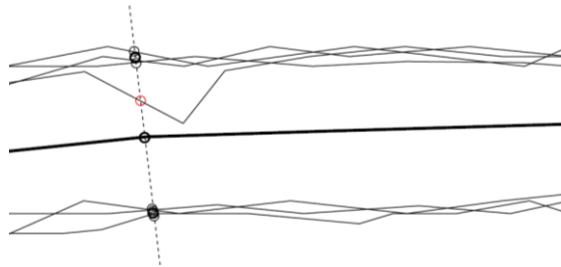


Figura 7.24 Esquema de la obtención del punto medio inicial.

3. Una vez se dispone de los puntos medios del comienzo del tramo para ambos carriles de circulación, se calcula el punto medio de ambos, con sus coordenadas locales correspondientes (ver figura 7.24).
4. Para la obtención del siguiente punto de la trayectoria media es necesario contar con un vector director, definido anteriormente para la delimitación de los tramos, y la distancia entre puntos de la trayectoria media (δ). Con estos datos, se crea una línea con origen en el primer punto calculado de la trayectoria media, dirección la del vector director y longitud la distancia indicada anteriormente (δ).
5. A partir del punto final del segmento creado, se traza una perpendicular a él mismo y se calcula la intersección entre este y las distintas trayectorias individuales. Para el cálculo de la intersección se recorren secuencialmente cada uno de los recorridos y se calcula la intersección de la perpendicular

con los segmentos formados por pares de puntos. En caso de que la intersección quede fuera del segmento (punto rojo en la figura 7.25), se avanza a la pareja de puntos siguiente y se repite el procedimiento. De esta forma, se obtienen los puntos intersección de la recta perpendicular con las trayectorias individuales. En la figura 7.25 se observa cómo se obtiene la intersección de cada una de las trayectorias con la perpendicular a la trayectoria media.

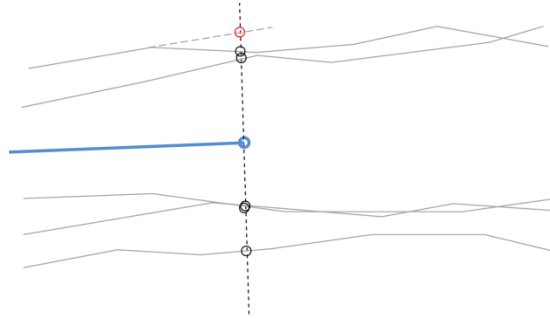


Figura 7.25 Esquema de la intersección de las trayectorias con la perpendicular a la trayectoria media

6. Una vez se tienen los puntos intersección entre las trayectorias individuales y la perpendicular a la trayectoria media, es necesario determinar si existe algún punto anómalo. Para ello, de la misma forma que se ha citado anteriormente, se utiliza el intervalo de confianza. Los puntos cuya distancia al punto medio queden fuera del rango serán eliminados. Esta depuración se realiza por separado para cada uno de los sentidos de circulación. Como resultado, se obtienen los puntos válidos de las trayectorias locales intersección con la perpendicular a la trayectoria media en ese punto.
7. Con los puntos resultantes de la intersección se calcula el punto medio para cada uno de los sentidos de circulación. Una vez calculados, el siguiente punto de la trayectoria media es el punto medio de ambos.
8. El nuevo vector director necesario para buscar el siguiente punto de la trayectoria media se obtiene como la unión entre el punto anterior de la trayectoria media y el punto que se acaba de obtener. Esta recta debe prolongarse la distancia que se marcó anteriormente como espaciamento entre puntos de la trayectoria media (δ), en sentido de avance del tramo.
9. Una vez prolongada la recta anterior, se traza la perpendicular por el último punto medio obtenido y se vuelve a comenzar el proceso a partir del punto 5.

Los procesos anteriores se realizan hasta que los segmentos de las trayectorias individuales necesarios para encontrar los puntos de la trayectoria media quedan fuera de los tramos. En ese momento, el proceso finaliza y la trayectoria media queda totalmente configurada.

La figura 7.26 muestra el resumen del procedimiento seguido para la obtención de la trayectoria media, en un punto intermedio. Como puede observarse, a partir del

punto 1' se prolonga la trayectoria media una distancia δ según la dirección anterior, creando el punto 2. En este punto se traza la perpendicular y se intersectan las trayectorias individuales. Tras eliminar los puntos anómalos, se determina el punto medio 2', que pasa a ser el punto perteneciente realmente a la trayectoria media. En este momento se une el punto 1' con el 2' y se prolonga otra distancia δ el segmento, dando como resultado el punto 3. A partir de ahí se repite el proceso. El siguiente segmento de trayectoria media irá del punto 2' al 3'.

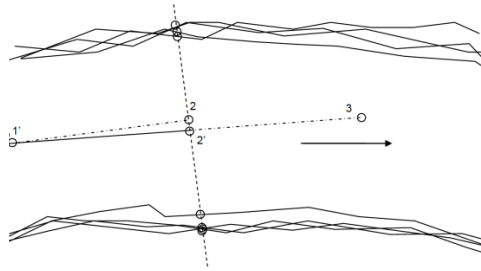


Figura 7.26 Esquema general del proceso de obtención de la trayectoria media

De esta forma, se han definido las trayectorias medias de cada uno de los tramos de carretera en los que se ha llevado a cabo la toma de datos. En la figura 7.27 se muestra la trayectoria media en coordenadas locales del tramo de la CV-35 comprendido entre Tuéjar y Titaguas. El resto han sido recopilados en el anexo V.

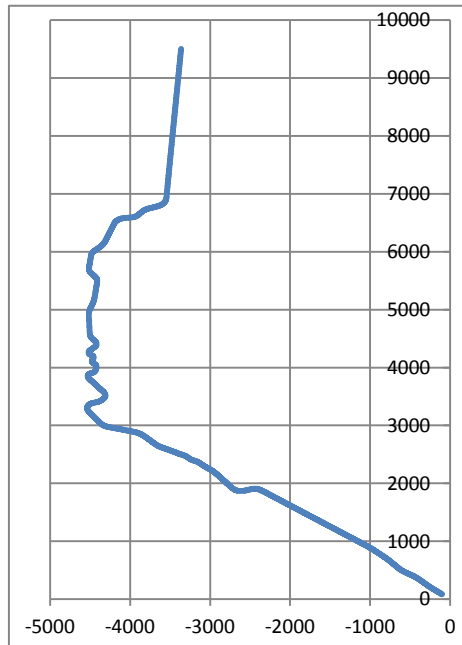


Figura 7.27 Trayectoria media del tramo 1: CV-35 [Tuéjar – Titaguas]

Comentarios al proceso de obtención de la trayectoria media

La obtención de la trayectoria media se basa en los recorridos realizados por una muestra de conductores en un tramo de carretera determinado. Por tanto, el número de trayectorias individuales puede ser variable y va a ser un factor determinante en la precisión de los resultados, además de influir en el tiempo de procesado.

El hecho de aumentar el número de trayectorias produce una mejora significativa en la precisión de los resultados obtenidos. Ello es debido a que los puntos de cada trayectoria tienden a distribuirse aleatoriamente a lo largo del trazado, aumentando la densidad de puntos.

Un mayor número de trayectorias aporta más datos de la geometría. De este modo, se pueden excluir trayectorias anómalas. Al aumentar la muestra, la trayectoria media final estará formada a partir de más datos, con lo que representará mejor la trayectoria de la vía.

Además, hay que tener en cuenta que la trayectoria media conseguida con este algoritmo es, salvo casos excepcionales como recorridos a baja velocidad por el centro del carril, la representación de la geometría de la línea que los conductores trazan al circular por la carretera. Así, puede observarse cómo los conductores no siguen el eje de la carretera, sino que tienden a abrirse en las curvas, ocupar parte del carril de sentido contrario o el arcén propio en algún punto, u otros aspectos operacionales.

Al llevar a cabo las trayectorias por diferentes conductores, los defectos particulares de cada conductor se verán atenuados por el resto, con lo que la trayectoria media obtenida finalmente se parecerá realmente a la trayectoria de operación.

Por otra parte, como ya se ha comentado anteriormente, los sistemas de posicionamiento GPS tienen ciertos errores. El hecho de disponer de varias trayectorias posibilita identificar los errores puntuales de los aparatos de GPS, permitiendo que el programa los detecte y no los tenga en cuenta en los cálculos.

El hecho de haber más trayectorias provoca mayor uniformidad en la distribución de los puntos de coordenadas GPS. De este modo, la máxima precisión posible que puede obtenerse para un recorrido en el que se han obtenido los datos de coordenadas de puntos cada 20 metros es de 20 metros, pero si se dispone de dos recorridos la precisión máxima aumenta hasta 10 metros. Con sólo veintiséis recorridos (por ejemplo, trece de ida y trece de vuelta), y un GPS que graba las coordenadas cada 20 metros aproximadamente, la precisión máxima conseguida es de 0,77 metros, notablemente mejor que las capacidades técnicas del sistema de posicionamiento.

Además del número de trayectorias individuales, el factor que más influye en la precisión de los resultados y el tiempo de procesamiento es la distancia entre puntos de la trayectoria media (δ) que debe elegirse al inicio del proceso.

Generalmente, a menor distancia entre puntos de la trayectoria media, el ajuste de la misma será mejor. Quedan excluidas de este razonamiento las distancias entre

puntos inferiores a la precisión máxima de la trayectoria, como anteriormente se ha explicado.

Normalmente la distancia más empleada para la obtención de la trayectoria media es de 5 metros, ya que el tiempo de computación es relativamente rápido y los resultados obtenidos no ofrecen diferencias apreciables con las trayectorias calculadas empleando una distancia de 1 metro. Sin embargo, no es suficiente precisión para la posterior restitución geométrica, ya que permite determinar de forma precisa las curvaturas y los radios de los elementos geométricos, pero no así las longitudes de los más cortos. Por ello se recomienda restituir la trayectoria media con una distancia entre puntos de 1 metro. Pese a ser un proceso más lento, permite obtener con una precisión muy elevada la geometría del tramo.

Distancias mayores de 5 metros no son recomendables, puesto que se genera una pérdida de precisión que ya puede ser apreciable a simple vista. Por ejemplo, para una distancia de 20 metros, la trayectoria puede desviarse respecto de la real en unos 20 cm. Además, el ahorro en tiempo de computación es mínimo debido a que el tiempo empleado para la trayectoria de 5 metros es suficientemente corto.

Las figuras 7.28 y 7.29 son una comparación de las trayectorias generadas para diferentes valores de distancia δ para el tramo en el que se realizaron las primeras pruebas. Las trayectorias representadas son las correspondientes a las distancias 5, 20 y 100 metros.

La primera de ellas muestra el tramo completo de la zona representada. Se puede observar cómo no se aprecian apenas diferencias entre las trayectorias, por lo que el comportamiento general de las trayectorias se mantiene.

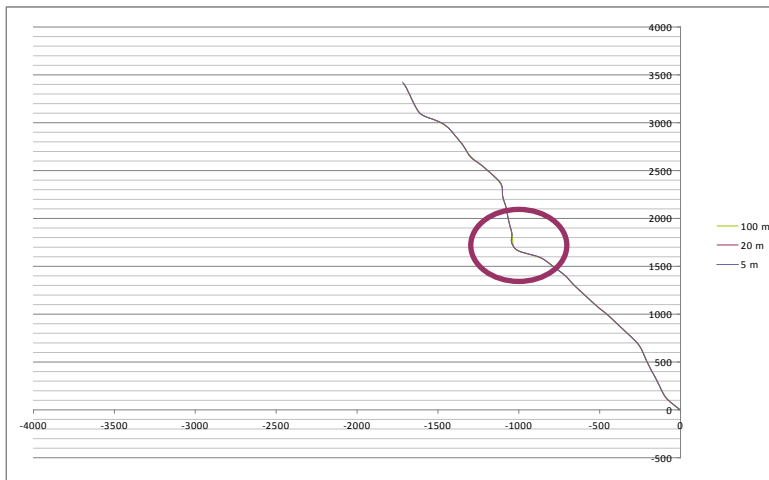


Figura 7.28 Ejemplo de trayectoria media calculada con diferentes distancias δ .

La segunda figura presenta la representación de la zona de mayor curvatura ampliada. En ella, sí se pueden observar importantes diferencias entre las trayectorias representadas. Se observa la elevada aproximación que supone realizar

los cálculos con un δ de 5 y de 20 m, mientras que disminuye al ampliar su valor a 100 m. No obstante, vuelve a aproximarse, aunque en menor medida que con valores de 5 y 20 m, al ajustar los datos obtenidos con 100 m mediante los splines propios del programa Excel.

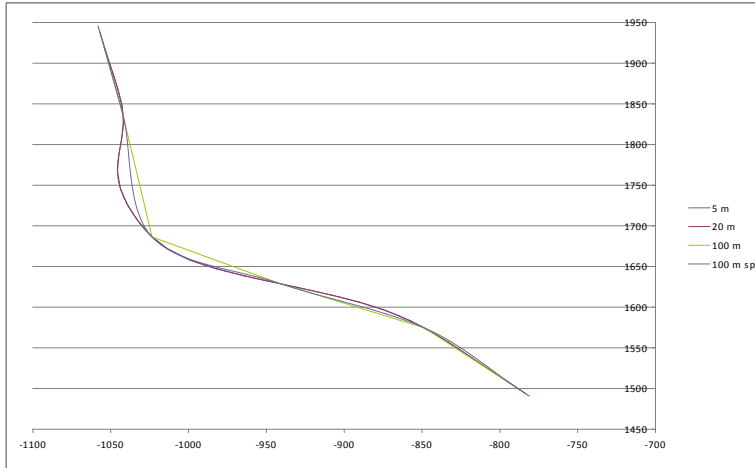


Figura 7.29 Detalle de un tramo de curva de la trayectoria media

Las trayectorias de 5 y 20 metros, aunque muestran diferencias, estas apenas son perceptibles. De igual modo, la trayectoria de distancias cada 1 metro se calculó y representó, pero en esta ocasión no se pudo encontrar ninguna diferencia con la de 5 metros.

La trayectoria de 100 metros sí presenta importantes diferencias con las anteriores. Se puede apreciar claramente en ella que se trata de una línea quebrada (como el resto, aunque en esta ocasión la diferencia es claramente visible). Los vértices de dicha línea se encuentran sobre la trayectoria real (puesto que son intersección con los segmentos de las trayectorias locales), por lo que sigue la trayectoria general de la vía. Sin embargo, realmente ya no se trata de una trayectoria continua. Además, si se hiciera una representación gráfica del diagrama de curvaturas, podría observarse cómo existen claras diferencias con los dos anteriores.

Finalmente, se decidió representar gráficamente (serie 100 sp) la serie de puntos de la trayectoria de 100 metros de distancia, pero empleando el método que Excel tiene para suavizar las series de puntos. Este método se basa principalmente en el empleo de splines cúbicos. Como resultado puede observarse una mayor convergencia de la trayectoria con la trayectoria obtenida con distancia 5 m, aunque no llegan a superponerse. Esto es debido a que las curvas empleadas para este ajuste son de tipo cúbico, mientras que las curvas empleadas en el diseño de vías son de tipo circular o espiral. Es por ello que, aunque se ajusta más a la trayectoria, no se puede tomar como válida.

Este último razonamiento persigue el objetivo de ver si es posible determinar la trayectoria media a partir de una mayor distancia y, posteriormente, suavizarla

mediante splines cúbicos, con el objetivo de ganar tiempo de cálculo. Como se ha visto, este procedimiento no es válido.

Representación de la trayectoria media en Google Earth

El software específico de los dispositivos GPS permite exportar los datos en formato texto para, posteriormente, importarlos en Excel. Así, es posible convertir los datos a formato *.kml, interpretable por el programa Google Earth, gracias a una aplicación desarrollada específicamente para este fin.

De esta forma, se consigue una representación gráfica de las trayectorias seguidas por los vehículos equipados con el rastreador GPS, diferenciando incluso por colores los tramos con diferentes velocidades, como muestra la figura 7.30.



Figura 7.30 Representación de los datos en Google Earth.

Siguiendo el mismo procedimiento se consigue una representación gráfica de la trayectoria media. La figura 7.31 muestra la representación de la trayectoria media del tramo de toma de datos 1, con un detalle de la misma. En el anexo V puede visualizarse la representación del resto de pruebas.



Figura 7.31 Representación en Google Earth de la trayectoria media del tramo 1: CV-35 [Tuéjar – Titaguas]

Se ha detectado un cierto desfase entre las coordenadas proporcionadas por los GPS y su representación en Google Earth. Este desfase es de aproximadamente un metro, variable con la dirección del aparato y con la hora del ensayo. Al realizar el ensayo aproximadamente en un tiempo constante, y realizarse los recorridos en sentido de ida y de vuelta, el error debido a la orientación del aparato se ve limitado, mientras que el debido a la hora del ensayo se limita a un desplazamiento en una misma dirección de todos los puntos. Al ser el desplazamiento común para todos ellos, es posible observar en una vista aérea cómo la trayectoria finalmente calibrada presenta la misma geometría que la vía original.

Como puede observarse en las figuras citadas, la desviación de la trayectoria media es inferior a la de las trayectorias individuales.

Obtención de la curvatura bruta

En el apartado anterior se ha obtenido una trayectoria media a partir de diversos recorridos por un tramo determinado. A partir de esta trayectoria media es posible determinar el diagrama de curvaturas al que mejor se ajusta.

El tipo de problema en este caso es completamente distinto al anterior, distinguiéndose principalmente del anterior en que en este caso la mayor o menor precisión alcanzada del modelo y sus propios resultados dependerán en gran medida de los parámetros introducidos por el ingeniero, debido a que se trata de un método de ajuste.

La curvatura en una zona localizada se puede obtener a partir de la trayectoria media basándose en secuencias de ternas de puntos, ya que a partir de tres puntos no alineados se puede trazar una circunferencia. Esta circunferencia tendrá un radio, que será considerado el radio local en ese punto de la trayectoria. A partir de dicho radio es posible obtener la curvatura localizada. Repitiendo el proceso para toda la secuencia de la trayectoria media es posible representar el diagrama de curvaturas.

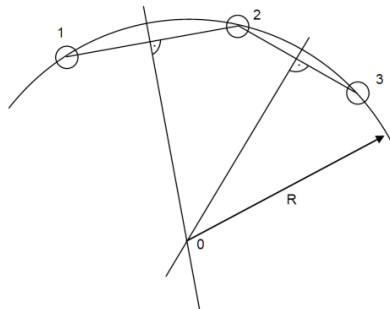


Figura 7.32 Esquema del método de obtención del radio a partir de tres puntos

Sin embargo, los diagramas de curvaturas obtenidos con la aplicación directa del anterior modelo son ampliamente insatisfactorios, ya que presentan un gran número de oscilaciones. Estas oscilaciones son debidas a que, aunque la trayectoria media obtenida para un tramo de carretera es continua y se ajusta perfectamente a la geometría real localizada, al no existir correlación en la secuencia de puntos, unas variaciones muy pequeñas producen un ruido excesivo en el diagrama de

curvaturas. Por ejemplo, en una curva a derechas puede existir un segmento con curvatura hacia el otro sentido, con lo que aunque la trayectoria se ajustará muy bien a la realidad, el efecto sobre el diagrama de curvaturas será una oscilación que impedirá su correcta restitución.

En la figura 7.33 se representa, de una forma muy esquemática, el diagrama de curvaturas obtenido a partir de una trayectoria media. Se puede observar cómo a partir de una desviación local muy pequeña de su trayectoria media puede producirse una gran alteración en el diagrama de curvaturas. De igual modo ocurre en el tramo recto: como nunca la trayectoria media es exactamente una línea recta a lo largo de su longitud, se producen una serie de oscilaciones en el diagrama de curvaturas. Todos estos efectos reciben el nombre de ruido, y son los causantes de que, aunque visualmente la trayectoria media obtenida tenga una geometría muy similar a la de la trayectoria real de la vía, el diagrama de curvaturas obtenido se parezca únicamente en la tendencia general al diagrama de curvaturas real.

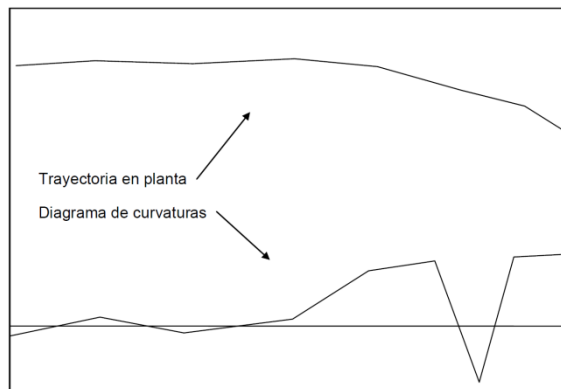


Figura 7.33 Ejemplo de un detalle del diagrama de curvaturas obtenido a partir de la trayectoria media

En el esquema de la figura 7.33 se puede ver cómo, pese a que la trayectoria recoge el comportamiento general de la vía, el diagrama de curvaturas resultante presenta una oscilación debido a los errores cometidos al aproximar una trayectoria por sus puntos. Este tipo de error puede resumirse en que este método de obtención de la curvatura refleja únicamente el carácter localizado del trazado, sin considerar su carácter más general.

Este tipo de error aumenta a medida que las distancias entre puntos decrecen, debido a que la trayectoria se ajustará más al comportamiento local de la vía y no al general. Es por ello que este efecto aumenta a medida que la distancia entre puntos de la trayectoria media decrece. De igual modo, si la distancia entre puntos de la trayectoria media aumenta, la precisión en el diagrama de curvaturas aumentará, aunque la precisión de la trayectoria se reducirá, por lo que el diagrama de curvaturas finalmente representado se corresponderá con la trayectoria calculada, pero no con la real.

Debido a la anterior conclusión, se necesitó desarrollar un método diferente para añadir carácter general del trazado a la curvatura local. El método empleado se basa en considerar para el cálculo de la curvatura más de tres puntos. Cuantos más puntos se escojan en el cálculo, más carácter general de la vía será introducido, pero se perderá carácter local. Por ello, también será necesario analizar los resultados del proceso.

Al número de puntos entre el punto donde se asocia la curvatura del diagrama y cada uno de los puntos extremos considerados para el cálculo se le denomina "cadencia".

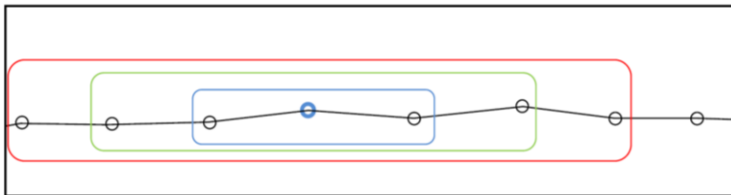


Figura 7.34 Esquema de la variable cadencia (cadencia 1, 2 y 3)

Se entiende como cadencia el número de puntos considerados a cada lado del punto donde se está calculando la curvatura. De este modo, en la figura 7.34 se muestra en azul la representación de la cadencia 1 (valor mínimo de la variable), en verde se representa la cadencia 2 y en rojo la 3.

Cálculo de la curvatura en función de la cadencia

El hecho de considerar más puntos para determinar la curvatura en una zona no implica que este cálculo de la curvatura se haga de manera diferente. De hecho, el único cambio reside en que se consideran todas las posibles ternas de puntos en el conjunto final determinado por la cadencia, arrojando así una curvatura que se ajusta mejor globalmente a los puntos considerados.

El número de puntos escogidos en función de la cadencia es: $n = 2 \cdot k + 1$, siendo k la cadencia escogida. El número de ternas posibles que se puede formar a partir de este número de puntos viene dado por la ecuación 56.

$$\binom{n}{3} = \binom{2k+1}{3} \quad (56)$$

El método final consiste en obtener todas las circunferencias formadas por cada una de las posibles ternas, y escoger finalmente la que más se aproxime a la totalidad de puntos, empleando un método de ajuste por mínimos cuadrados. Este método proporciona resultados mejores que el anterior método, aunque el tiempo de cálculo aumenta significativamente a partir de valores de cadencia como 4 ó 5 (84 y 165 combinaciones, respectivamente).

Para ello, para cada terna de puntos, se calcula la circunferencia asociada (radio y centro) y para cada circunferencia, se determina el error cuadrático medio empleando la ecuación 57.

$$ECM = \sum_{P_1}^{P_{2k+1}} (R_m - \overline{P_0 P_i})^2 \quad (57)$$

donde:

ECM : Error Cuadrático Medio

P_i : punto de la trayectoria (1 para el primero de la secuencia).

k : cadencia

R_m : radio medio del centro de la circunferencia hasta todos los puntos abarcados por la cadencia (no sólo la terna considerada para su cálculo)

P_0 : punto del centro de la circunferencia.

$\overline{P_0 P_i}$: distancia entre el centro de la circunferencia y el punto i de la trayectoria

De entre todas las posibles ternas generadas, se escoge la que presenta menor ECM. El radio y el centro de la circunferencia de dicha terna será el escogido de forma provisional.

La circunferencia con la que así se calcula la curvatura es la que mejor se ajusta de todas las ternas planteadas. Sin embargo, únicamente se ha analizado un número limitado de posibles soluciones. Existe un método que permite, a partir de una solución particular, convertir el espacio de posibles soluciones a un modelo continuo y buscar la mejor de todas. Este método, que se denomina "método del gradiente", se desarrollará en el siguiente subapartado. El resultado será la solución de mejor aproximación a la curvatura de la trayectoria media. Una vez encontrado el centro de menor error cuadrático medio, el radio asociado al punto correspondiente de la trayectoria será el promedio de las distancias entre dicho centro y los puntos de la trayectoria media.

Así, se tiene para cada punto de la trayectoria media el radio asociado (y por tanto la curvatura) y el centro. Sin embargo, falta determinar el sentido de la curvatura. Este sentido se obtiene analizando el sentido del área del triángulo que forman los puntos extremos de la serie considerada y el centro de la circunferencia obtenida por el método del gradiente (ver ec. 58).

$$A = \begin{vmatrix} P_{1x} & P_{0x} & P_{2k+1x} \\ P_{1y} & P_{0y} & P_{2k+1y} \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (58)$$

Si el signo del determinante es positivo, la curva gira a la izquierda, y viceversa.

En este momento, ya se tiene la curvatura en el punto considerado. Sin embargo, y pese a la mejora en la consideración de puntos respecto a otros algoritmos, los diagramas de curvatura obtenidos siguiendo el actual método presentan todavía alguna oscilación, especialmente alrededor de las zonas de curvatura nula. Es por ello que existe un procedimiento adicional insertado en este punto con el objetivo de disminuir el ruido al máximo. Este procedimiento únicamente es capaz de eliminar el ruido en las zonas donde la curvatura debe ser nula. Se basa en la comparación del centro de mejor ajuste con el centro medio de todas las ternas empleadas en la búsqueda de la óptima.

Se calcula el centro medio de todos los centros de las circunferencias consideradas. En caso de que sea una recta, es esperable que cierto número de centros queden a un lado de la vía y otros al otro lado. Ello conduce a que el centro global obtenido como la media de todos los centros existentes se aleje mucho del centro de mejor aproximación obtenido. Por ello, se le impone el siguiente criterio: si el radio de mejor aproximación dividido por el radio medio es superior a 1.2, se supone que los centros están suficientemente alejados y que por tanto forman parte de una recta. En este caso se sustituye la curvatura existente por 0. En la figura 7.35 se muestra un ejemplo de depuración de los datos por comparación entre los centros. En azul se representa el centro de mejor ajuste para cadencia 3 (por ejemplo), en negro los centros de todas las circunferencias de su grupo de puntos y en rojo el centro medio de estas últimas. Al ser una recta, los dos centros medios difieren mucho y en el diagrama de curvaturas se simplificará a 0.

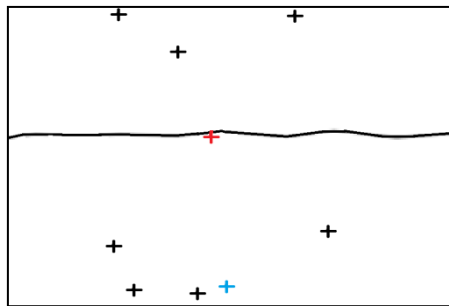


Figura 7.35 Ejemplo de depuración de los datos por comparación entre los centros

En este momento se dispone de la secuencia de datos para cada punto de la trayectoria media. La curvatura que se dibuje en el diagrama será un coeficiente por la inversa del radio.

Los datos anteriores ya generan un diagrama de curvaturas suficientemente aceptable. Sin embargo, todavía existe un proceso posterior que elimina más ruido del diagrama de curvaturas. Este proceso se basa en la comparación de la lista de curvaturas: cada curvatura con la del anterior y el siguiente punto. En este proceso se recorre la lista de curvaturas brutas realizando la siguiente acción:

1. Si existe un punto perteneciente a una recta y los dos puntos adyacentes presentan una curvatura no nula, sustituye la curvatura de la recta por el valor medio de las curvaturas de los puntos adyacentes (en caso de que estas sean del mismo signo). El objetivo de este proceso es corregir las curvas de los diagramas de curvaturas, que en ocasiones presentan, en medio de una curva, un punto errático que el programa interpreta como recta. Gracias a este algoritmo este tipo de puntos erráticos quedan eliminados.
2. Si existe un punto perteneciente a una curva y tiene dos puntos antes y otros dos después de curvatura nula, se considera que pertenece a una recta, y se procede a eliminar su curvatura.

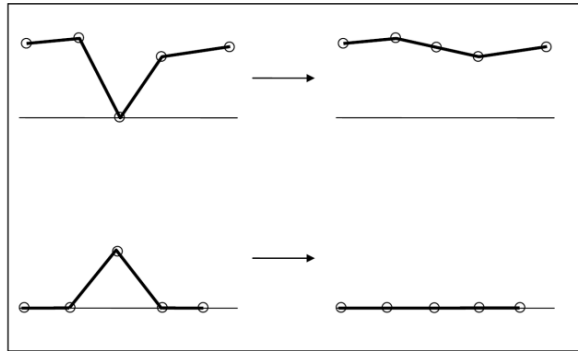


Figura 7.36 Esquema del último proceso de depuración para la obtención del diagrama de curvaturas bruto

Con todo ello, ya se dispone del diagrama de curvaturas bruto totalmente depurado.

Método del gradiente

Este método aplicado al cálculo de las curvaturas de los puntos tiene como objetivo encontrar el centro (y el radio) de la circunferencia que mejor se ajuste a los puntos que se le dan como entrada.

En la figura 7.37 se muestra un esquema del procedimiento. Se encuentra representado el ECM de cada punto para el ajuste de todos los puntos considerados. El objetivo del algoritmo es encontrar el mínimo de la función, para lo que se irá recorriendo la superficie de la figura, buscando el mínimo absoluto.

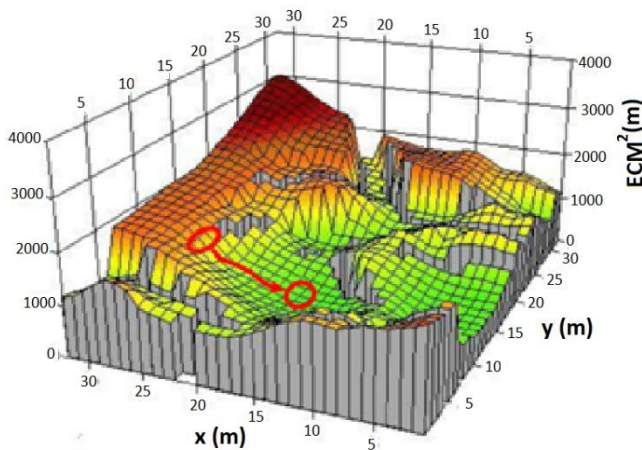


Figura 7.37 Esquema del funcionamiento del proceso de utilización del método del gradiente

Partiendo de un centro obtenido anteriormente, se calculan las circunferencias con centros a distancia y al norte, sur, este y oeste de la solución inicial, obteniendo cuatro nuevos puntos. En cada uno de ellos, el radio de la circunferencia ficticia es el promedio de las distancias hacia los puntos que forman la serie de datos. De cada

una de las soluciones analizadas se calcula el error cuadrático medio (mediante la misma ecuación que se presentó anteriormente). En caso de que una de las soluciones tenga un ECM menor que la inicial, el centro de la circunferencia se traslada y vuelve a comenzar el proceso de ajuste del gradiente.

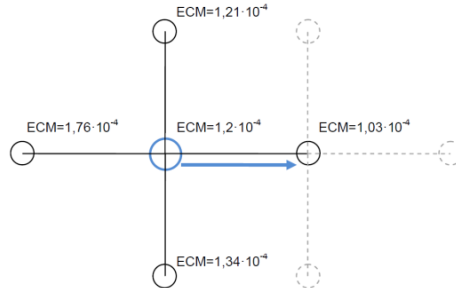


Figura 7.38 La solución se traslada por los diferentes puntos en función del ECM

En el momento en que el ECM del punto central sea menor que los errores de los cuatro puntos analizados, se reduce la distancia a la que debe calcular los nuevos puntos y se repite el proceso. De esta forma, mediante cálculos discretos, se es capaz de analizar un espacio continuo de soluciones sin cometer grandes errores.

En la figura 7.39 se muestra cómo al encontrar el punto con menor ECM, se procede a dividir la distancia por la mitad y a repetir el proceso.

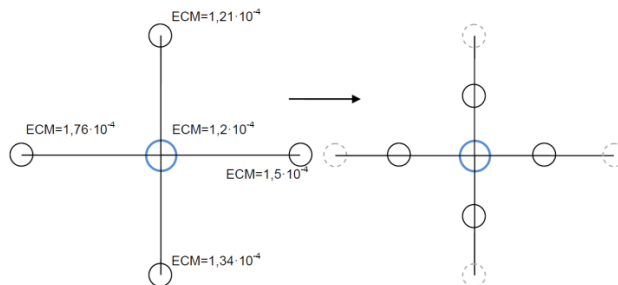


Figura 7.39 El proceso del método del gradiente se repite tras la reducción de la distancia

El número de veces que se realiza la división de la distancia por la mitad también lo decide el ingeniero.

El proceso puede resumirse en las siguientes etapas:

1. Dado un centro inicial, cálculo de los centros situados a distancia y al norte, sur, este y oeste de dicho centro.
2. Cálculo de la distancia promedio de cada uno de los nuevos centros a la serie de puntos considerada.
3. Cálculo del ECM de cada una de las soluciones.
4. Búsqueda del ECM menor entre los cinco de que se dispone: el centro original y los cuatro calculados. Existen dos posibilidades:

- a. El ECM menor es el situado en el punto central original. En este caso se divide la distancia entre 2 y se vuelve a comenzar el proceso a partir del punto 1.
 - b. El ECM menor se encuentra en uno de los nuevos puntos. En este caso se desplaza el centro original al nuevo punto con menor ECM y, con la misma distancia, se repite el proceso desde el punto 1.
5. Si se detecta que el ECM del punto central es el menor de los cinco y la distancia a emplear en la iteración ya es el resultado de dividir la distancia original el número de veces μ indicado por el usuario, se da por bueno el resultado y finaliza la iteración.

Comentarios al proceso de obtención de la curvatura bruta

Siguiendo el procedimiento descrito y gracias a la aplicación informática desarrollada para llevarlo a cabo, se obtiene un diagrama de curvaturas. Sin embargo, si se analizan los anteriores apartados, existen cuatro variables que influyen sobre el diagrama final:

- Distancia entre puntos de la trayectoria media (δ)
- Cadencia (k)
- Distancia para el método del gradiente (γ)
- Número de divisiones en el método del gradiente (μ)

De las cuatro variables, puede omitirse la influencia de las dos últimas, puesto que su incidencia sobre el diagrama de curvaturas final es mínima.

De las dos anteriores, se enunció anteriormente que una menor distancia entre los puntos de la trayectoria media provocaba una disminución en la precisión del diagrama de curvaturas, ya que dicho diagrama perdía poder de representar el carácter general de la vía. Este fenómeno se muestra en la figura 7.40, donde se presenta el diagrama de curvaturas bruto obtenido para el tramo 1 estudiado a partir de la trayectoria media calculada con dos valores diferentes de δ : 1 y 5, ambas con la misma cadencia.

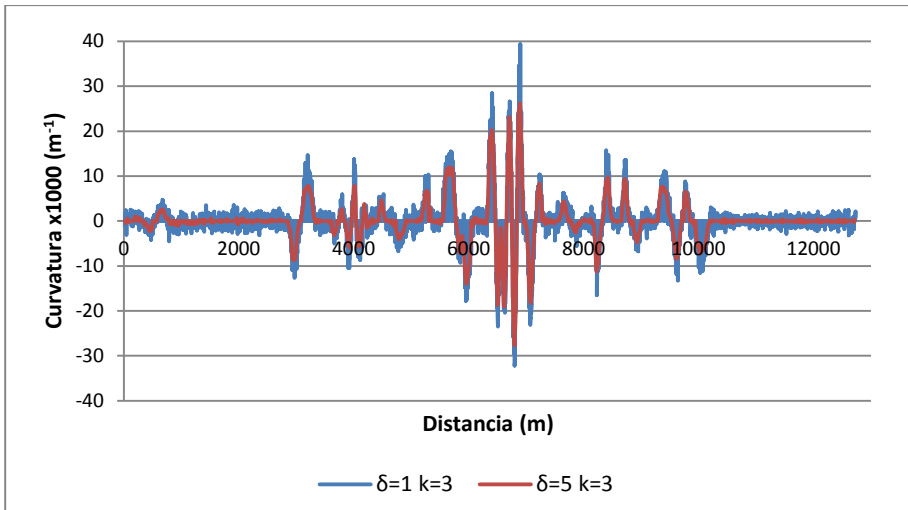


Figura 7.40 Comparación de diagrama de curvaturas bruto para trayectorias medias calculadas con diferentes valores de δ

La figura 7.41 muestra el detalle de la zona central del diagrama anterior.

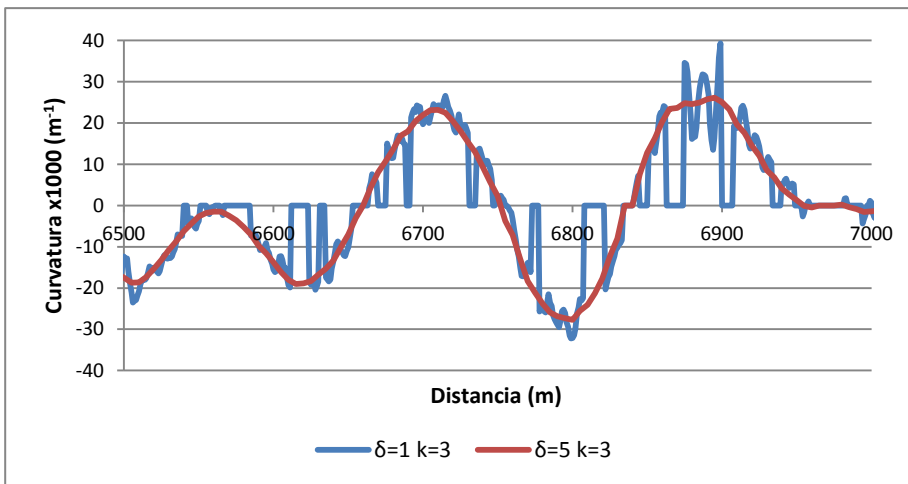


Figura 7.41 Detalle de diagrama de curvaturas bruto para trayectorias medias calculadas con diferentes valores de δ

La cadencia es el factor más influyente sobre la curvatura de la vía. Valores más bajos de la cadencia consideran de forma más local la curvatura, mientras que valores más altos le proporcionan un carácter más general.

Gracias a la cadencia se puede suavizar el diagrama de curvaturas, necesitándose generalmente contrastar varias salidas de resultados con el objetivo de determinar con qué cadencia se obtiene el mejor diagrama de curvaturas.

En cuanto a los resultados obtenidos, la cadencia 1 proporciona diagramas de curvaturas ilegibles, debido al ruido. Además, en estos casos al existir una única terna de puntos para cada cálculo, los algoritmos posteriores de búsqueda del ECM y el método del gradiente no pueden buscar soluciones de mejor precisión (ya que el ECM en este caso es nulo).

La cadencia 2 proporciona diagramas de curvatura demasiado oscilantes, pero ya es posible determinar el comportamiento de la vía.

Es a partir de la cadencia 3 cuando los diagramas de curvaturas obtenidos pueden comenzar a utilizarse. Esta cadencia presenta todavía alguna oscilación, pero no impiden ver el comportamiento del diagrama y obtener el estado de alineaciones a partir de una depuración del mismo.

Al igual que las cadencias pequeñas generan diagramas muy oscilantes, las cadencias grandes generan diagramas con el efecto contrario: diagramas muy suaves. Esto no debería suponer un inconveniente, si no fuera porque las curvaturas comienzan a decrecer respecto de los anteriores diagramas. Esto es debido a que el incorporar más carácter general a la curvatura local de la vía implica que las curvas con radio reducido incorporarán para su cálculo puntos que no pertenezcan inicialmente a dicha curva, por lo que tenderán a suavizarse.

Si se comparan diferentes diagramas de curvatura, puede observarse que, con una distancia entre puntos δ de 5 metros, el rango apto de cadencia k es desde 3 hasta 6, aproximadamente. Valores inferiores provocan diagramas muy oscilantes, mientras que en los diagramas de curvatura calculados con cadencias superiores a dicho rango las curvaturas comienzan a disminuir apreciablemente.

Dentro del rango enunciado anteriormente, y válido generalmente para la mayoría de diagramas, el comportamiento de los diagramas es muy estable, siendo generalmente los generados con cadencias 4 ó 5 los más aceptables.

En las figuras 7.42 y 7.43 se puede observar la comparación de los diagramas de curvatura bruta obtenidos para el tramo 1 estudiado con diferentes valores de la cadencia k . No se ha representado el de cadencia 1 porque presenta tantas oscilaciones que dificulta la lectura del resto. La segunda figura es un detalle de la primera en la zona de mayor curvatura.

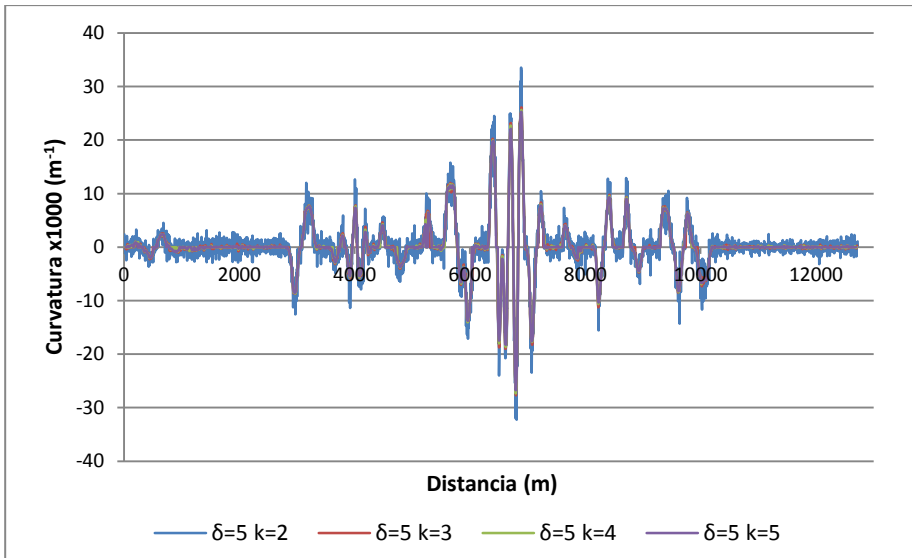


Figura 7.42 Comparación de diagrama de curvaturas bruto para diferentes cadencias

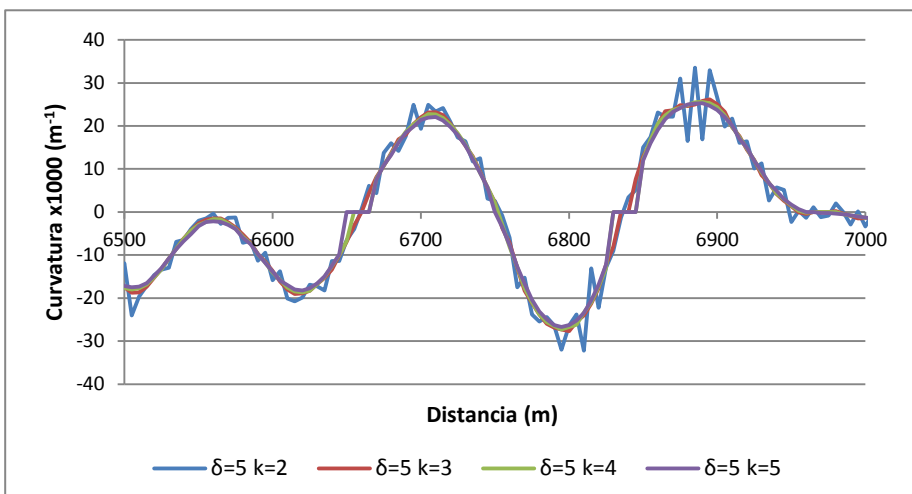


Figura 7.43 Detalle de diagrama de curvaturas bruto para diferentes cadencias

Obtención del diagrama de azimut bruto

A partir de la trayectoria media, es posible obtener fácilmente el diagrama de azimut bruto punto por punto de la trayectoria, utilizando la ecuación 59.

$$\text{Azimut (gon)}_i = \frac{200}{\pi} \operatorname{atan} \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{y_{i+1} - y_i} \right) \quad (59)$$

Siendo x_i y y_i las coordenadas tomadas de las obtenidas para la trayectoria media.

En la figura 7.44 se muestra la representación del diagrama de azimuts del tramo de carretera 1, obtenido a partir del cálculo del azimut para cada uno de los puntos.

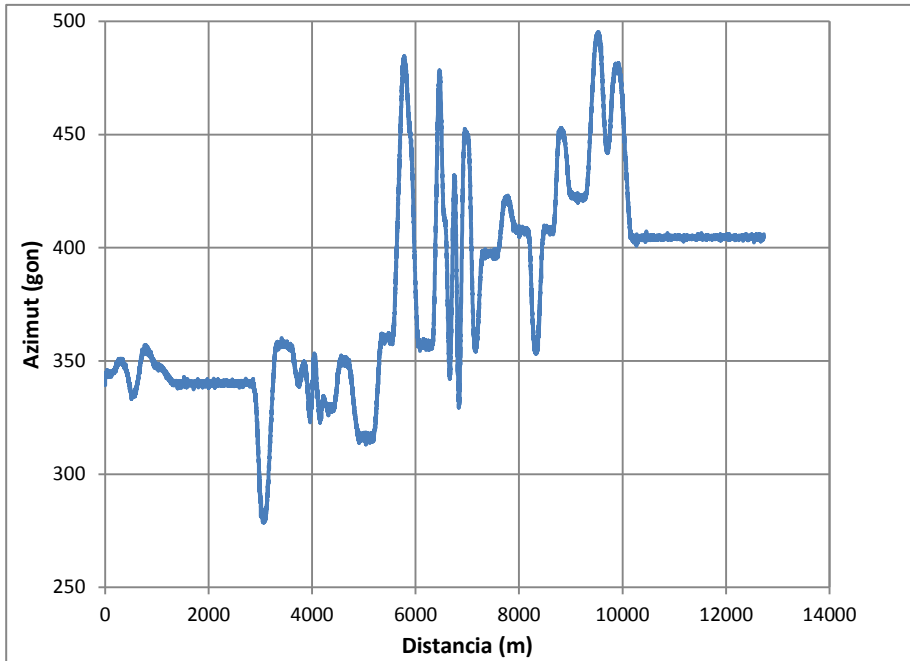


Figura 7.44 Ejemplo de diagrama de azimut bruto del tramo 1

En la figura 7.45 se muestra un detalle de la anterior.

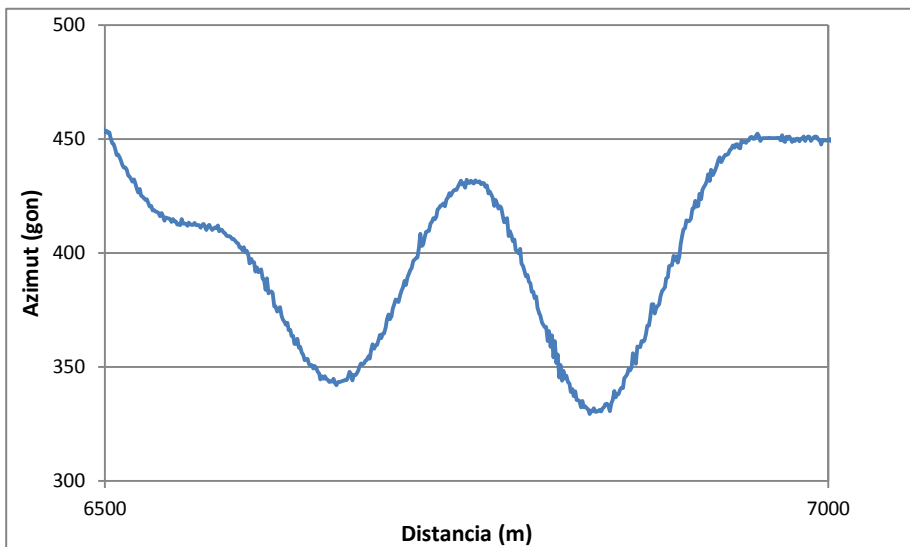


Figura 7.45 Ejemplo de diagrama de azimut bruto del tramo 1. Detalle

Como puede comprobarse, se observa claramente los distintos elementos que forman parte del trazado, siendo rectas los tramos con azimut constante, las curvas los tramos con variación lineal del azimut y las clotoides los tramos en los que el azimut varía de forma aproximadamente parabólica.

Obtención de los datos geométricos del trazado en planta de la carretera

En este apartado se describe el proceso necesario para obtener las características geométricas de los elementos de la vía. Esta geometría es la que se necesitará, posteriormente, para el estudio del comportamiento de los conductores en función de la velocidad desarrollada a lo largo de los distintos elementos y las deceleraciones y aceleraciones entre los diferentes elementos geométricos.

Para este estudio, las variables geométricas más significativas son la longitud de las rectas, el radios y la longitud de las curvas circulares, el parámetro y la longitud de las curvas de transición y el ángulo girado de los tramos curvos, incluyendo curva circular y curva de transición.

En los apartados anteriores se ha descrito cómo obtener el diagrama de curvaturas y el diagrama de azimuts. Utilizando como punto de partida cada uno de ellos se han desarrollado sendas metodologías para la restitución de la geometría del trazado en planta de la carretera.

Restitución de la geometría en planta de la carretera tomando como base el diagrama de curvaturas bruto

En este apartado se describe el proceso necesario para ajustar al diagrama de curvaturas bruto un diagrama de curvaturas neto, convertible a un estado de alineaciones. Es necesario realizar este ajuste ya que el diagrama de curvaturas bruto permite una lectura aproximada del comportamiento de la carretera, pero no es factible obtener un estado de alineaciones a partir de él debido al ruido que presenta.

El método utilizado comienza con la identificación del punto de máxima curvatura bruta en valor absoluto perteneciente a una curva. Con el fin de evitar que exista una curvatura máxima generada por un punto errático local, se considera la curvatura en un punto como el promedio de las curvaturas de este punto y de los dos adyacentes.

Tras identificar el punto de máxima curvatura perteneciente a una curva, se procede a la determinación de los puntos que forman parte de ella. Así, se van incluyendo puntos a cada lado del punto inicial. Para cada uno de ellos se evalúa la diferencia en valor absoluto entre el radio del nuevo punto y el radio del punto anterior. Si la diferencia es menor que cierto porcentaje introducido por el usuario, se considera que el nuevo punto pertenece a la curva. En caso contrario, el punto no pertenece a la curva circular y el proceso de adición de datos por ese lado finaliza.

Al finalizar la determinación de todos los puntos que pertenecen a la curva, se calcula el radio de esta como el promedio de los radios de todos los puntos que se encuentran dentro de la ella. Esta solución se mejora empleando el método del gradiente, ya explicado en el proceso de obtención de la curvatura bruta. Para ello, a partir del punto inicial y del punto final se traza la mediatriz y se prolonga a una

distancia de una apotema, para obtener el centro correspondiente al radio calculado en el paso anterior. A partir de este nuevo centro se aplica el método del gradiente para encontrar la solución óptima.

De esta forma, la curva queda definida mediante este radio y la longitud, obtenida como la distancia entre el primer y último punto de la curva.

Una vez definida la primera curva, se procede a la búsqueda del siguiente punto de máxima curvatura entre los puntos no pertenecientes a la anterior. La curvatura promedio detectada debe ser superior a la introducida como límite por el usuario. Es necesario que el usuario establezca este radio máximo a considerar en la búsqueda de curvas, ya que es posible que de otra forma se identifiquen como puntos de máxima curvatura aquellos que únicamente se producen por el ruido.

Una vez identificado el punto con máxima curvatura, se determina si pertenece a una curva o a una clotoide. En caso de pertenecer a una curva, lo más probable es que los puntos más cercanos presenten menor curvatura, mientras que en caso de ser una clotoide, los puntos más cercanos por un lado tendrán más curvatura, mientras que los del otro tendrán menos curvatura. Por ello, se procede a analizar el promedio de los 3 puntos más cercanos a cada lado por separado y, dependiendo de la casuística mencionada, el punto se situará en una curva circular o en una clotoide.

Si el punto es considerado como parte de una curva circular, se procede como se ha explicado en los párrafos anteriores para la definición de la nueva curva. La identificación y definición de alineaciones curvas finaliza cuando los puntos restantes se identifican como parte de una clotoide o su curvatura es inferior a la fijada como límite por el usuario.

Por tanto, en el ajuste de curvas, el procedimiento se basa principalmente en dos parámetros fijados por el usuario: el radio máximo de las curvas y el máximo porcentaje de variación del radio entre puntos de una curva.

Se ha realizado un análisis de sensibilidad del procedimiento ante ambos parámetros. En él se ha comprobado cómo al considerar, como radio máximo, un valor muy alto, por ejemplo 8000 metros, zonas pertenecientes a tramos rectos se identifican como curvas. Por otra parte, considerando valores inferiores, como 1000 metros, curvas de radio amplio son ajustadas como zonas de recta.

En la figura 7.46, correspondiente a una zona inicial del diagrama de curvaturas neto ajustado para el tramo 1 estudiado, se observan las diferencias que se producen al considerar estos dos umbrales para el radio máximo del ajuste. En ella se observa cómo en el inicio del tramo al utilizar un radio máximo de 8000 metros se ajustan 5 curvas en sentido dextrógiro mientras que con un radio máximo de 1000 metros este tramo se ajusta como una recta. En la figura 7.47 se presenta este mismo tramo en Google Earth, donde puede comprobarse como se trata efectivamente de una curva a derechas. Lo mismo ocurre en el tramo entre el PK 1+200 y el PK 1+400.

Sin embargo, en el entorno del PK 2+000, el ajuste de curvaturas con radio máximo 8000 metros identifica 3 curvas, cuando, como puede comprobarse en la figura 7.48, se trata de una recta.

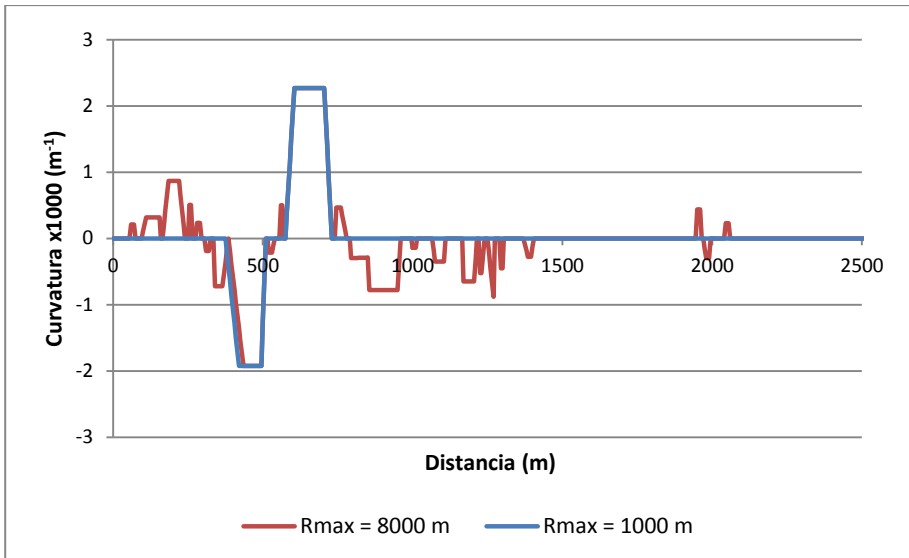


Figura 7.46 Detalle del diagrama de curvaturas neto del tramo 1, con diferentes valores de radio límite



Figura 7.47 Detalle de la primera curva del tramo 1 no identificada por el ajuste de curvaturas con $R_{máx} = 1000$ m



Figura 7.48 Detalle de la recta situada en el entorno del PK 2+000 del tramo 1 no identificada por el ajuste de curvaturas con $R_{\text{máx}} = 8000$ m

Asimismo, se ha estudiado también cómo varía el diagrama de curvaturas ajustado al considerar diferentes porcentajes de variación del radio entre puntos de una curva, porcentaje que determina la pertenencia o no de un punto a la curva. Los resultados de este análisis, en el que se han incluido los diagramas de curvaturas de todos los tramos de carretera estudiados, confirman que:

- Porcentajes de variación muy pequeños (10 %) en curvas circulares de cierto desarrollo, dan como resultado varias curvas donde en realidad sólo existe una. El umbral de longitud de las curvas circulares a partir del cual se produce esta situación depende de la oscilación de los datos de la curvatura bruta. (Figura 7.49).

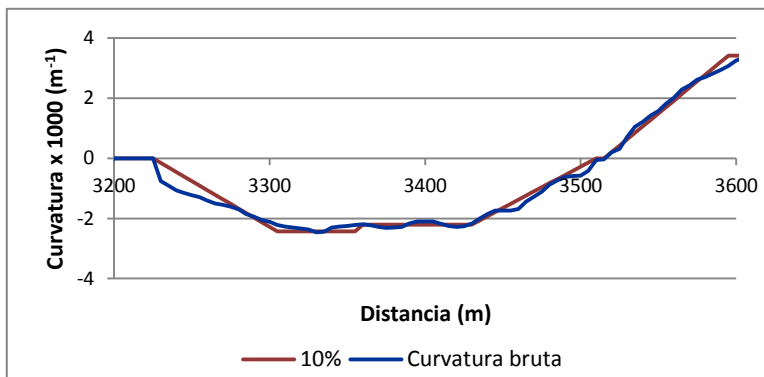


Figura 7.49 Detalle 1 del diagrama de curvaturas neto del tramo 4, con diferentes valores de porcentaje de variación del radio entre puntos de una curva

- Porcentajes de variación muy pequeños (10 %) ajustan, en general, curvas con un desarrollo inferior al real. (Figura 7.50).

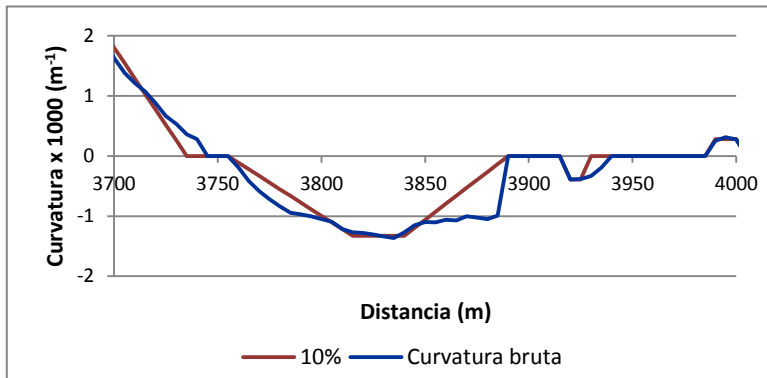


Figura 7.50 Detalle 2 del diagrama de curvaturas neto del tramo 4, con diferentes valores de porcentaje de variación del radio entre puntos de una curva

- Porcentajes de variación muy grandes (70 %) dan como resultado curvas circulares de mayor longitud de la que realmente tienen, así como un radio mayor al real. (Figura 7.51).

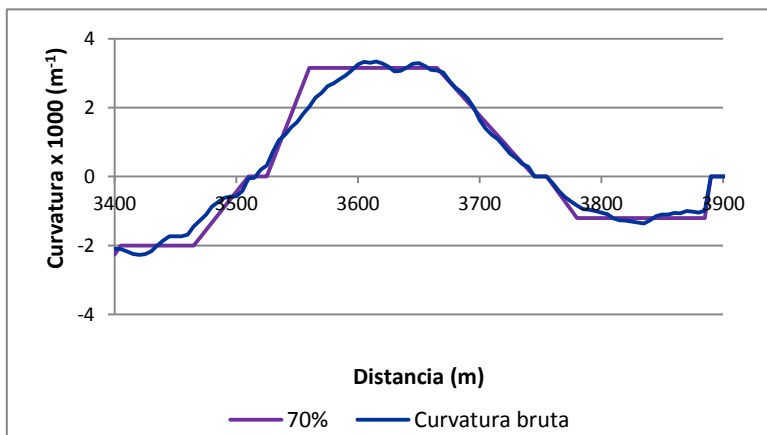


Figura 7.51 Detalle 3 del diagrama de curvaturas neto del tramo 4, con diferentes valores de porcentaje de variación del radio entre puntos de una curva

Para la elaboración de las figuras anteriores se ha empleado el ajuste de curvaturas del tramo de carretera 4 estudiado y no el 1 como en las figuras previas debido a que en este tramo se presenta la casuística de las tres conclusiones.

En general, cuando el diagrama de curvaturas brutas es más suave, es decir, el ruido es menor, el valor del porcentaje de variación puede ser menor y el resultado será más ajustado. Sin embargo, cuando el diagrama de curvaturas brutas presenta más cantidad de oscilaciones, el porcentaje de variación considerado deberá ser mayor y el resultado será menos ajustado.

Después de este análisis de sensibilidad, se ha concluido que los valores más adecuados para el tipo de datos disponible gracias a los GPS de 1 Hz, cuando la trayectoria media se ha obtenido con una distancia entre puntos de 5 metros y la cadencia para la obtención del diagrama de curvaturas brutas ha sido 5, son: 1000 metros como valor del radio máximo a considerar con el fin de no incluir el ruido en el ajuste, y 40 % como porcentaje de variación del radio entre puntos de una misma curva. No obstante, en caso de identificar curvas con un radio mayor será necesario aumentar el radio máximo para el ajuste, eliminando manualmente las curvas ajustadas debidas al ruido.

El siguiente paso en el proceso de ajuste del diagrama neto de curvaturas es la identificación y definición de las clotoides. Para ello, se tiene en cuenta que una clotoide puede encontrarse en la transición recta-curva, curva-recta o curva-curva con diferentes radios (óvalo). Por tanto, en el proceso de ajuste de las curvas de transición se parte de los extremos de cada una de las curvas determinados anteriormente.

Partiendo del punto final de una curva circular, se van analizando los puntos sucesivos hasta el inicio de la siguiente alineación, que puede ser una curva ya identificada en el paso anterior o una recta. Se considera que la siguiente alineación es una recta cuando se identifican dos puntos consecutivos con curvatura inferior a 0.0001 m^{-1} .

Una vez encontrada la siguiente alineación, se determina hasta qué punto se debe evaluar el corte con el segmento horizontal en el diagrama de curvaturas. Para ello, se traza de forma iterativa rectas entre el punto extremo desde el cual parte la clotoide y los sucesivos puntos de la alineación siguiente. En cada una de estas iteraciones, se calcula la intersección entre la clotoide trazada y la siguiente alineación. Posteriormente, se evalúa el error cuadrático medio obtenido de comparar la curvatura bruta con la curvatura neta obtenida, entre el punto inicial de donde parte la clotoide y el punto intersección entre la clotoide y la siguiente alineación. Un esquema de este proceso se muestra en la figura 7.52, donde se muestra en rojo las clotoides extremo analizadas.

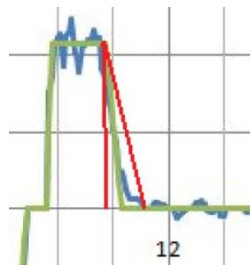


Figura 7.52 Esquema del ajuste de las curvas de transición

De todas las clotoides trazadas, la que presenta menor error cuadrático medio es la clotoide solución.

Tras finalizar la identificación y definición de las curvas circulares y de las curvas de transición, los puntos restantes se consideran parte de alineaciones rectas y, por tanto, se les asigna curvatura nula.

En la figura 7.53 se muestra el diagrama de curvaturas neta ajustado para el tramo 1 de carretera estudiado. Para obtenerlo se ha fijado un radio máximo de 3000 metros, ya que se han identificado en la fotografía aérea curvas de radio amplio, como se ha comentado anteriormente. Los diagramas del resto de tramos se recogen en el anexo V.

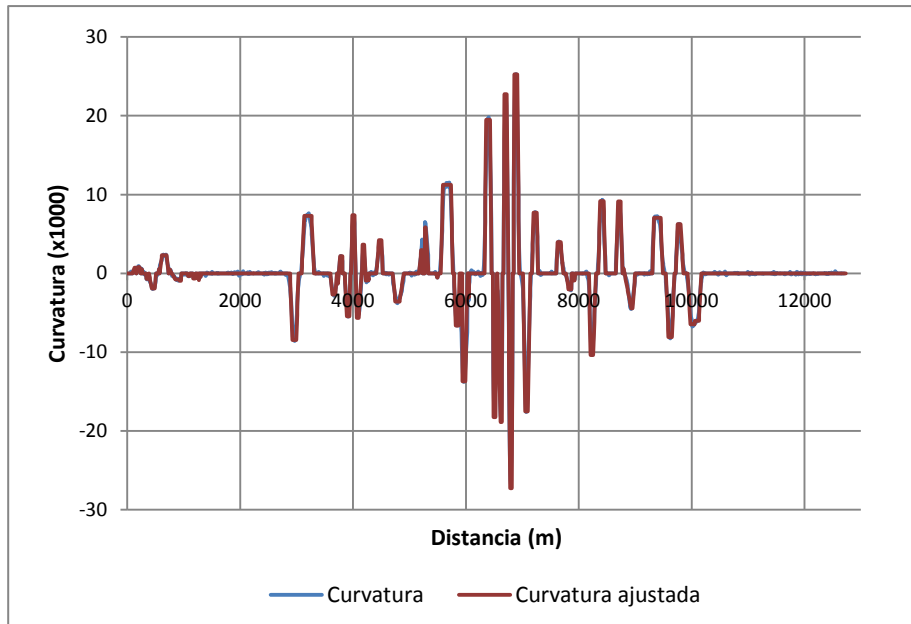


Figura 7.53 Diagrama neto de curvaturas del tramo 1

A partir del diagrama de curvaturas ajustado, la obtención del estado de alineaciones es inmediata.

Restitución de la geometría en planta de la carretera tomando como base el diagrama de azimuts bruto

Los diferentes elementos geométricos que constituyen un tramo de carretera pueden definirse a partir del diagrama de curvaturas, como se han definido en el proceso anterior, o mediante el diagrama de azimuts. El azimut se relaciona con la curvatura según la expresión de la ecuación 60.

$$\frac{1}{R} = \frac{d\theta}{ds} \quad (60)$$

Siendo $1/R$ la curvatura (m^{-1}) definida como la inversa del radio, θ el azimut (gonios) y s la distancia (m).

Teniendo en cuenta esta relación, los diferentes elementos geométricos de una carretera pueden describirse en función del azimut, según se muestra en la tabla

Elemento geométrico	Curvatura	Azimut
Recta	$C = 0$	$\theta = \int 0 \cdot ds = \theta_k$
Curva circular	$C = c_k$	$\theta = \int c_k \cdot ds = c_k \cdot s + \theta_k$
Clotoide	$C = \frac{s + d_o}{A^2}$	$\theta = \int \frac{s + d_o}{A^2} \cdot ds = \frac{1}{A^2} \cdot \left[\frac{s^2}{2} + d_o \cdot s + \theta_k \right]$

Tabla 7.12 Caracterización de los elementos geométrico mediante el azimut

Así, las alineaciones rectas se caracterizan por un azimut constante, las curvas circulares presentan una variación lineal del azimut y las curvas de transición una variación parabólica.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se describe a continuación el proceso desarrollado para ajustar a un diagrama de azimuts bruto un diagrama de azimuts neto, que permita definir el inicio y el final de cada alineación y sus características. Con estos datos se completa el estado de alineaciones y el diagrama de curvaturas correspondiente.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Obtención de la longitud y radio de las curvas circulares.
2. Obtención de la longitud y azimut de las rectas.
3. Obtención de la longitud y el parámetro de las clotoides.

Los tramos de curvas circulares en el diagrama de azimuts se corresponden con los tramos de variación lineal de azimut, por lo que son fácilmente identificables, a pesar del ruido (ver figura 7.54).

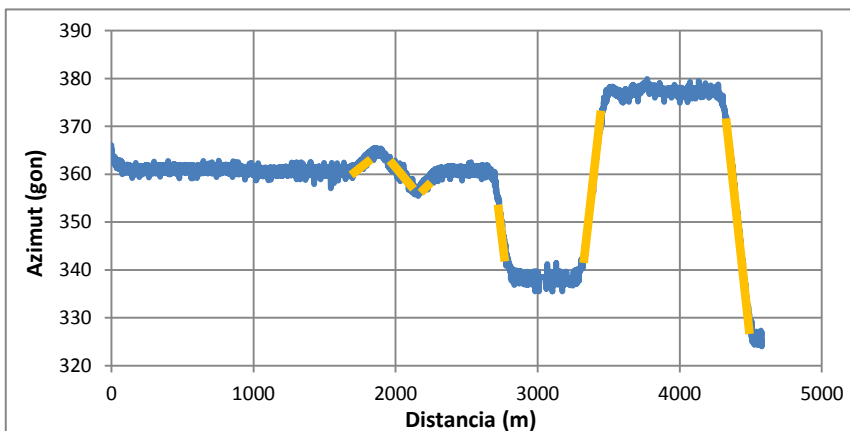


Figura 7.54 Representación de curvas circulares en el diagrama de azimuts del tramo 3

El primer paso es indicar los puntos que claramente pertenecen a la curva circular, es decir, aquellos puntos que se encuentran en el tramo en el que el azimut varía linealmente (ver figura 7.55).

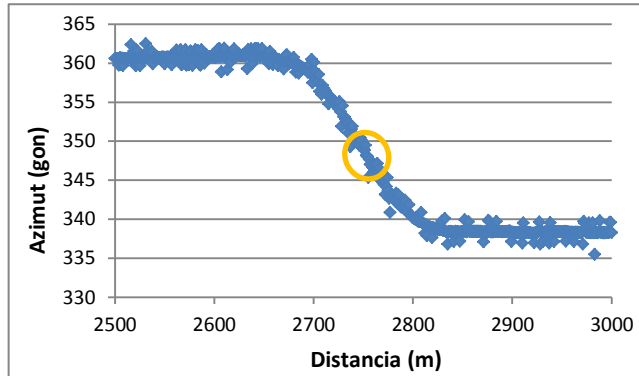


Figura 7.55 Identificación de puntos pertenecientes a una curva circular

A partir de estos datos, se lleva a cabo el siguiente proceso de iteración:

- Con los puntos seleccionados se lleva a cabo una regresión lineal y se calcula el ECM correspondiente (ECM_0), definido según la ecuación 61.

$$ECM = \frac{\sum_1^n (azimut_{e_i} - azimut_{o_i})^2}{n} \quad (61)$$

donde:

ECM : error cuadrático medio.

$azimut_{e_i}$: azimut estimado por la ecuación de regresión.

$azimut_{o_i}$: azimut observado.

n : número de puntos utilizados en la regresión.

- Se añade un punto en cada extremo del segmento, se calcula de nuevo la regresión y se obtiene el ECM de esta iteración (ECM_1).
- Se compara el ECM_1 con el ECM_0 .
- Si ECM_1 es menor que ECM_0 , se añade un punto más a cada extremo, se calcula la regresión lineal y se obtiene el ECM correspondiente (ECM_3). Se compara ECM_3 con el de la iteración anterior y, si es inferior, se vuelve a añadir un punto en cada extremo. Se procede de esta forma hasta que el ECM de una iteración sea superior al de la iteración anterior.
- Cuando el ECM_{i+1} es superior a ECM_i , se eliminan los dos puntos que se han añadido y se procede a la extensión de la curva únicamente por un extremo. Para ello, se realizan sucesivas inserciones de puntos por ese extremo y se va calculando en cada una de esas inserciones el ECM. Este ECM se compara con el de la inserción anterior y se procede a la siguiente inserción siempre que el último sea menor al anterior.

- Si el último ECM es superior al anterior, se añaden dos puntos más por ese extremo, para evaluar si este aumento del ECM es debido a la tendencia de los datos o simplemente al ruido existente. Si se mantiene un ECM superior, los puntos de la última inserción se eliminan y la extensión por este extremo finaliza. En caso contrario, se procede a la siguiente inserción.
- El proceso se lleva a cabo del mismo modo por el otro extremo.

De esta forma, se llega a la solución que menor ECM produce.

Una vez detectados los puntos que pertenecen a la curva circular, se obtiene la longitud de la curva como la diferencia de los pk de los puntos extremos y la variación de azimut como la diferencia entre los puntos extremos del azimut obtenido de la recta de regresión final. A partir de estos dos valores, es posible calcular el radio de la curva con la ecuación 62.

$$R = \frac{L}{\Delta Azimut} \quad (62)$$

donde:

R : radio de la curva (m).

L : longitud de la curva (m).

$\Delta Azimut$: variación de azimut (rad).

Este procedimiento hay que realizarlo para cada una de las curvas circulares, de forma que todas las del tramo queden definidas por su radio y longitud. Además, también se dispone del azimut en el inicio y final de la curva.

Una vez identificadas y definidas las curvas circulares, se procede a la definición de los tramos rectos. Los tramos de recta se corresponden con los tramos de valor constante del diagrama de azimuts (figura 7.56).

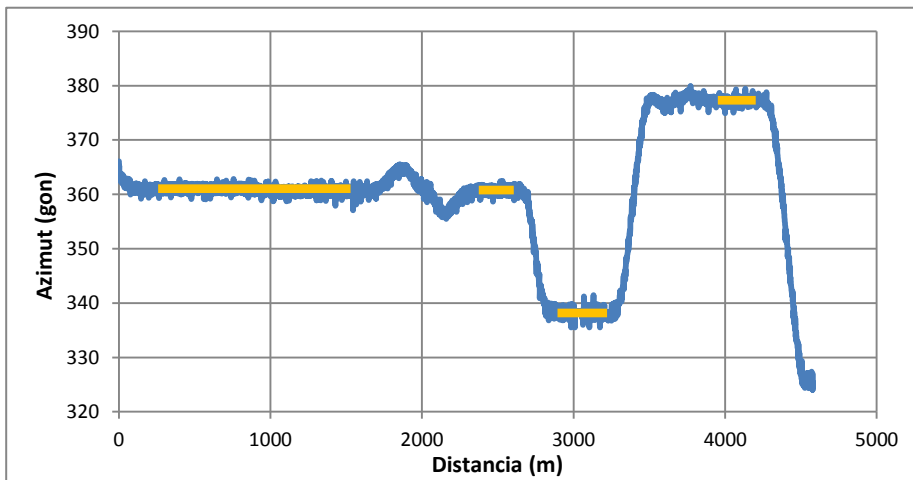


Figura 7.56 Representación de rectas en el diagrama de azimuts del tramo 3

Para la definición de las rectas, el proceso comienza con la identificación de una serie de puntos que claramente pertenezcan al correspondiente tramo recto en el diagrama de azimuts (ver figura 7.57).

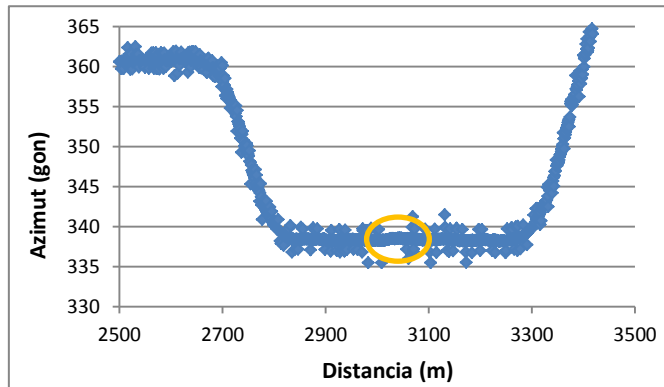


Figura 7.57 Identificación de puntos pertenecientes a una recta

A partir de estos puntos, se procede de forma similar a la descrita para el caso de la definición de las curvas circulares, extendiendo en primer lugar la recta por ambos extremos y, posteriormente, por cada extremo por separado.

El proceso comienza con el cálculo del promedio de azimut de los puntos que se encuentran entre los designados como pertenecientes a la recta. A partir de ahí, comienza el proceso de iteración. Se calcula el ECM entre el azimut promedio y los de los puntos seleccionados. En la siguiente iteración se añade un punto a cada lado de los extremos y se vuelve a calcular el azimut promedio y el correspondiente ECM. Si este es menor que el anterior se prosigue a la siguiente iteración. En el caso en que el ECM sea mayor que el de la iteración anterior se procederá según se ha detallado en el caso de las alineaciones curvas.

Una vez quedan definidos los puntos que forman parte de la recta, se calcula el azimut de la misma como promedio de los azimuts de todos los puntos y la longitud de la recta como la diferencia de pk de los puntos extremos.

Tras definir completamente las alineaciones rectas y circulares, se procede a la identificación y definición de las curvas de transición.

La caracterización de las clotoides es más complicada que la de los otros dos elementos, ya que se pueden dar diferentes casos: curva circular-clotoide-recta o recta-clotoide-curva circular, curva circular-clotoide-clotoide-curva circular (curva en C o en S) y curva circular-clotoide-curva circular (óvalo).

En el caso de que una clotoide se encuentre entre una recta y una curva, al conocer el pk del final (o inicio) de la recta y el inicio (o final) de la curva, ya está definida su longitud. Conocida la longitud de la clotoide y el radio de la curva circular, es posible calcular el parámetro de la clotoide según la ecuación 63.

$$A^2 = R \cdot L \quad (63)$$

donde:

A : parámetro de la clotoide (m).

R : radio de la curva circular (m).

L : longitud de la clotoide (m).

En el caso de que la clotoide se encuentre entre dos curvas, la composición esperada será: curva circular – clotoide – clotoide – curva circular. De esta combinación, conocemos la longitud y el radio de las dos curvas circulares extremas y la longitud suma de las dos clotoides.

El primer paso es identificar los puntos extremos de las curvas circulares adyacentes que serán los puntos de partida para la caracterización de las clotoides, que partirá de la base de que en las curvas de transición el azimut varía de forma parabólica (ver figura 7.58).

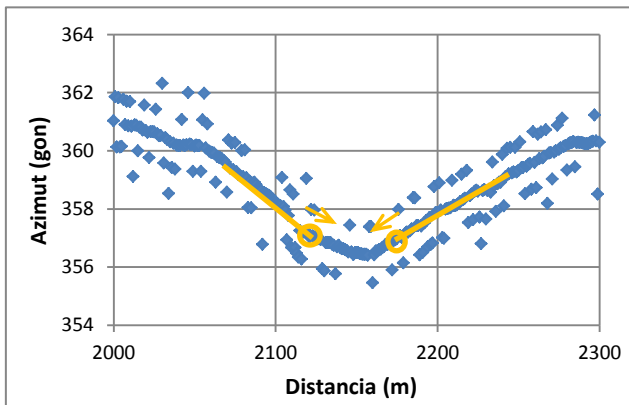


Figura 7.58 Identificación de los puntos iniciales del ajuste de dos clotoides consecutivas

En el proceso de ajuste de las curvas de transición, la presencia de puntos anómalos tiene una mayor influencia que en el resto de casos, debido al pequeño número de datos (uno por metro de longitud) para un ajuste parabólico. Por ello, es necesario en primer lugar identificar los puntos pertenecientes al ruido debidos a la metodología de toma de datos. En este proceso se consideran como ruido aquellos puntos cuya diferencia con el azimut del punto anterior sea superior al 0.1 % del valor de la diferencia de azimut entre los anteriores. Cuando un punto es identificado como ruido, para la evaluación del punto siguiente se halla el porcentaje de diferencia de azimut con el punto anterior al punto identificado como ruido.

Una vez identificados estos puntos, el valor de su azimut se estima como el promedio del azimut de los puntos adyacentes. De esta forma, el ruido se elimina y el ajuste se simplifica.

Para el ajuste, se parte de cada uno de los puntos extremos de las curvas circulares adyacentes. El valor del azimut en estos puntos es la referencia tanto para la evaluación del ruido como para el proceso de ajuste.

Para cada una de las clotoides, el proceso de ajuste comienza con la adición de los dos puntos adyacentes que no forman parte de la curva circular.

A continuación, se añade el siguiente punto y se halla la diferencia de azimut entre este punto y el anterior. Si esta diferencia tiene el mismo signo que la diferencia de azimuts del par de puntos anterior, se considera que el punto pertenece a la clotoide y se procede a la inserción del siguiente punto.

El proceso de ajuste finaliza cuando durante dos inserciones consecutivas la diferencia de azimuts ha cambiado de signo (encuentro de la siguiente clotoide) o la diferencia entre azimuts tiende a cero (encuentro con la posible alineación recta intermedia). Esta última situación puede producirse cuando existe una recta corta, no identificada previamente.

Una vez identificados los puntos extremos de la clotoide se ajusta la parábola que menor ECM produce, fijando los puntos extremos y variando el intermedio.

En el caso de existir una recta intermedia, la longitud de las clotoides viene dada por la distancia entre los puntos identificados como extremos y el cálculo de los respectivos parámetros se realiza según la ecuación 63.

Si la combinación es curva circular – clotoide – clotoide – curva circular, tras el ajuste se dispone de datos del valor del radio en el punto inicial y final de cada clotoide y la longitud de estas. Teniendo en cuenta que el punto de inflexión entre ambas clotoides tiene curvatura nula, para el cálculo del parámetro de cada clotoide se utiliza la ecuación 64.

$$A^2 = R \cdot L \quad (64)$$

donde:

A : parámetro de la clotoide (m).

R : radio de la curva circular (m).

L : longitud de la clotoide (m).

Finalmente, si se trata del caso curva circular – clotoide – curva circular (óvalo), una vez conocidos el pk final de la primera curva y el pk inicial de la segunda, es posible calcular la longitud de la clotoide delimitada por ellas y obtener el parámetro de la misma a partir de la ecuación 65.

$$A^2 = \frac{L_{c1-2} \cdot R_1 \cdot R_2}{R_2 - R_1} \quad (65)$$

donde:

A : parámetro de la clotoide (m).

L_{c1-2} : longitud de la clotoide entre las curvas 1 y 2 (m).

R_1 : radio de la curva circular con radio menor (m).

R_2 : radio de la curva circular con radio mayor (m).

De esta forma, dado un diagrama de azimuts de un tramo de carretera, quedan identificadas y definidas las diferentes alineaciones que constituyen el trazado geométrico en planta del mismo.

El proceso de obtención de la restitución de la geometría en planta de la carretera también está implementado en la aplicación informática, siendo uno de los más dependientes del usuario. En los anteriores, la aplicación desarrollada realiza todos los cálculos a partir de los datos de entrada y de la definición de algunos parámetros. En este caso, la intervención del ingeniero es esencial en todas las fases.

Esto es debido a que, como ha podido observarse, muchos de los criterios empleados se basan en la experiencia del usuario y en la visualización de los resultados previamente obtenidos. Por ello, la persona que se encarge de este proceso no puede limitarse a ejecutar el programa, sino que tiene que tener cierto criterio para identificar cada una de las posibles alineaciones.

Conforme se van caracterizando los distintos elementos se van dibujando en el mismo gráfico que el diagrama de azimuts de forma que el usuario pueda identificar cualquier error cometido por la aplicación y solventarlo.

A partir de los parámetros calculados para cada una de las alineaciones se puede componer el estado de alineaciones. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estos datos son aproximados, por lo que habitualmente se encuentran incoherencias en los azimuts. Estas incoherencias son generalmente errores menores (se han detectado máximos de 4 gonios) que podrán ser subsanados por el usuario.

En la figura 7.59 se muestra el diagrama de azimuts ajustado para el tramo 1 de carretera estudiado. Los diagramas del resto de tramos en los que se ha llevado a cabo la toma de datos se recogen en el anexo V.

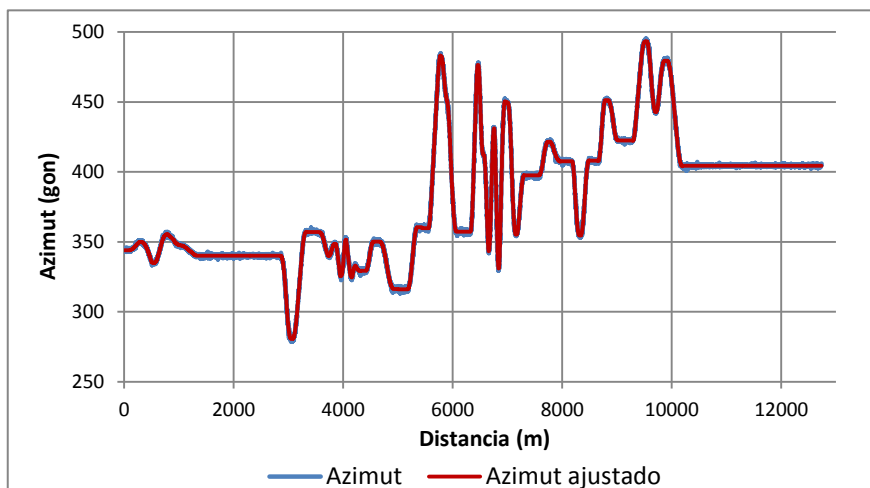


Figura 7.59 Diagrama neto de azimuts del tramo 1

Comparación de las dos metodologías para la restitución de la geometría de la carretera

Para la caracterización de los diferentes elementos geométricos que componen el trazado en planta de un tramo de carretera, se han desarrollado dos metodologías distintas para el tratamiento de los datos de posición procedentes de los dispositivos GPS utilizados en la toma de datos. Una de las metodologías se basa en el diagrama de curvaturas bruto y la otra en el diagrama de azimuts bruto.

Para la utilización de la metodología basada en el diagrama de curvaturas, es necesario utilizar la trayectoria media obtenida con una distancia entre puntos (δ) de 5 metros, ya que con una distancia menor sería necesario un valor excesivamente elevado de la cadencia para lograr resultados satisfactorios, alargando de forma excesiva el tiempo de cálculo. Sin embargo, en el caso del diagrama de azimuts estas oscilaciones son mucho menores y una mayor cantidad de puntos permite un mejor ajuste, por lo que la trayectoria media utilizada es aquella cuya distancia entre puntos es 1 metro, lo que redundará en una mayor precisión del resultado.

Una vez se dispone del diagrama de curvaturas bruto o del diagrama de azimuts bruto a partir de la trayectoria media correspondiente, en ambos casos se procede al ajuste. Para el ajuste del diagrama de curvaturas neto el usuario de la aplicación desarrollada debe fijar los valores de ciertos parámetros, como son el radio máximo de las curvas circulares, el porcentaje de variación del radio entre puntos de una misma curva y la curvatura a partir de la cual un punto es considerado como parte de una alineación recta. A diferencia de este, al ajustar el diagrama de azimuts neto el usuario únicamente debe identificar en el diagrama las diferentes casuísticas mencionadas previamente. Esta posibilidad de identificación de casuísticas no se ha considerado en el caso del diagrama de curvaturas ya que es muy posible que la identificación se viera influenciada por el ruido.

Estas formas de proceder, suponen las ventajas e inconvenientes de ambas metodologías.

La ventaja de la metodología basada en el diagrama de curvaturas frente a la basada en el diagrama de azimuts es, principalmente, que el usuario únicamente necesita fijar los valores de los parámetros citados. Sin embargo, este es también su principal inconveniente, ya que, como se ha descrito en el apartado correspondiente, los resultados son muy sensibles a los valores de los parámetros fijados.

Por su parte, la metodología basada en el diagrama de azimuts tiene como principal ventaja que no depende del valor fijado para ningún parámetro. Sin embargo, la interacción del usuario con la aplicación es en este caso esencial, ya que es él quien tiene que decidir qué casuística o tipología de alineación debe ajustar la aplicación. Esto supone un mayor trabajo para el usuario, sin embargo, los resultados son más fiables, debido a que no dependen de los valores asignados a ciertos parámetros, que deberán ser calibrados para cada tipo de datos.

Para la evaluación de la diferencia en los resultados obtenidos con cada una de las metodologías, se han comparado los diagramas de curvaturas restituidos, obtenidos a partir del diagrama de curvaturas bruto y del diagrama de azimuts bruto, para cada

uno de los tramos de carretera estudiados. En la figura 7.60 se muestran en un mismo gráfico ambos diagramas de curvaturas para el tramo 3. Para la obtención de este diagrama a partir del diagrama de curvaturas bruto se ha fijado como radio máximo el valor del radio máximo identificado a partir del diagrama de azimuts.

Para el resto de pruebas, los gráficos correspondientes se recogen en el anexo V.

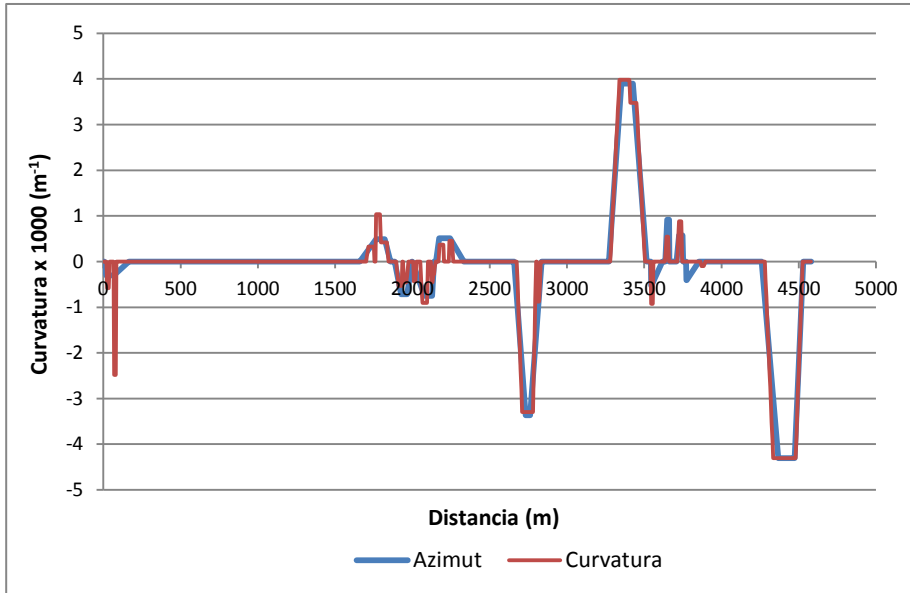


Figura 7.60 Comparación de los diagramas de curvaturas del tramo 3 obtenidos con las dos metodologías

Las principales diferencias se producen en curvas de radio superior a 1000 metros (curvatura inferior a $0.001 m^{-1}$), en las que, generalmente, al utilizar el diagrama de curvaturas se identifican un número de curvas superior al existente, debido al ruido. Este problema puede solucionarse marcando como radio máximo del ajuste 1000 metros, pero de esta forma curvas con radio superior a este valor son identificadas como rectas.

En la comparación de diagramas realizada para todos los tramos estudiados, se han seleccionado 111 curvas, que han podido ser identificadas una a una en ambos diagramas. Con ellas, se ha realizado el gráfico de la figura 7.61, que muestra cómo los radios obtenidos con ambas metodologías son muy similares, lo que aporta fortaleza a ambas metodologías. Únicamente se ha identificado una curva con radio superior a 1000 metros, que ha sido ajustada por ambas metodologías de forma similar.

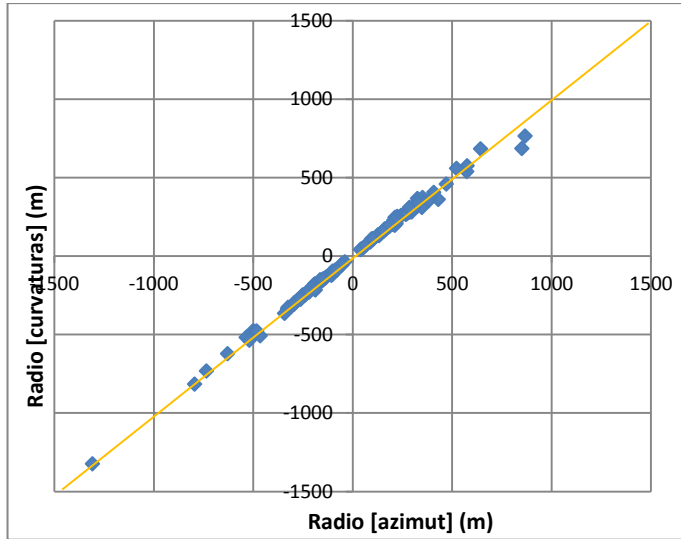


Figura 7.61 Radio obtenido a partir del azimut bruto vs radio obtenido a partir de la curvatura bruta

En la figura 7.62 se muestra un gráfico similar comparando el desarrollo asignado a cada curva circular. En ella se observa que, en general, la longitud de la curva circular ajustada por curvaturas es mayor que la ajustada por azimut. Sin embargo, de la observación de las gráficas similares a la figura 7.60 realizadas para cada uno de los tramos, se concluye que aunque la longitud de la curva circular varía, la longitud de la curva incluyendo las clotoides adyacentes es muy similar.

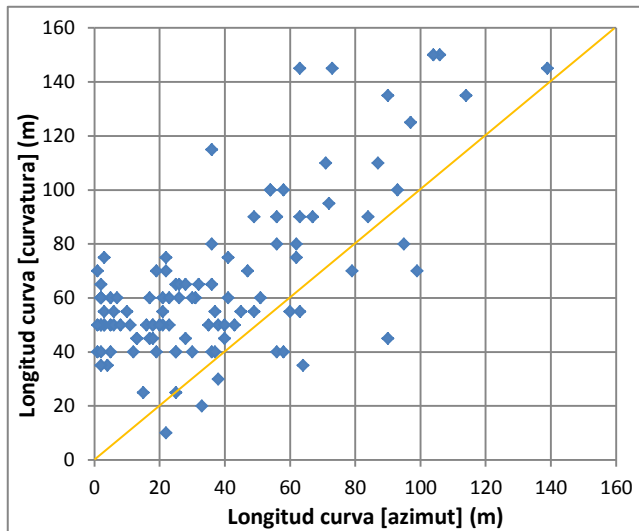


Figura 7.62 Longitud de la curva obtenida a partir del azimut bruto vs longitud de la curva obtenida a partir de la curvatura bruta

Entre el resto de las curvas, en 48 casos (25 %) a partir del diagrama de azimuts se ha identificado una sola curva mientras que con el diagrama de curvaturas se han identificado varias; con este último se han identificado 27 (14 %) curvas de radio amplio, cuando en realidad se trataba de tramos rectos; y dos curvas no se han identificado. Después de estudiar estos casos en imágenes aéreas puede concluirse que con el diagrama de azimuts se obtienen resultados más ajustados a la realidad.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, para la obtención de las características geométricas del trazado en planta de los tramos estudiados, que permita el estudio de la velocidad de operación y las variables asociadas, se ha empleado la metodología de restitución de la geometría de la carretera basada en el diagrama de azimuts.

En el anexo V, se muestran los estados de alineaciones de cada uno de los tramos de carretera estudiados, obtenidos mediante la metodología basada en el diagrama de azimuts.

Validación de la restitución de la geometría de un tramo de carretera

Los métodos de restitución de la geometría del trazado en planta de un tramo de carretera parecen comportarse adecuadamente, especialmente el basado en el diagrama de azimuts. Sin embargo, es necesario llevar a cabo la validación de los métodos. Esta validación se ha llevado a cabo de dos formas distintas: validación del método de restitución y validación de los dispositivos GPS.

En la primera de ellas se pretende comprobar si la restitución de la geometría de un tramo de carretera, obtenida a partir de la aplicación de las metodologías descritas a un conjunto de trayectorias individuales, se corresponde con la geometría del proyecto de construcción correspondiente.

La segunda validación consiste en la comparación de la geometría restituida de un tramo de carretera a partir de un número pequeño de trayectorias obtenidas con los dispositivos GPS descritos anteriormente (1 Hz), la geometría restituida de ese mismo tramo a partir de una única trayectoria obtenida con un dispositivo GPS de 10 Hz, la obtenida a partir de las trayectorias obtenidas de las jornadas de toma de datos y la geometría restituida mediante un software de diseño de obras lineales a partir de un modelo digital del terreno.

Validación del método de restitución

Con el fin de comprobar si las metodologías descritas para la restitución o estimación de la geometría en planta de un tramo de carretera se ajustan a la realidad, se ha recurrido a la comparación entre las restituciones obtenidas y el estado de alineaciones del proyecto constructivo de ese tramo, a partir de la comparación de los diagramas de curvaturas resultantes. Asimismo, se ha dibujado la geometría en planta correspondiente a cada uno mediante un software de diseño de obras lineales sobre una foto aérea, con el fin de comprobar el grado de ajuste a la geometría real.

El tramo de carretera del que se dispone el proyecto constructivo se encuentra entre el Pk 16+250 y el Pk 19+250 de la carretera CV-660, entre los municipios de

Ontinyent y Fontanars (Comunidad Valenciana). En la tabla 7.13, se muestra el estado de alineaciones presentado en el citado proyecto.

Alineación	PK Inicio	PK Final	Azimut inicio	Azimut final	Radio
curva	0	156.049	270.4705	310.208	250
recta	156.049	224.288	310.208	310.208	
curva	224.288	260.43	310.208	297.4257	-180.001
recta	260.43	353.402	297.4257	297.4257	
curva	353.402	389.723	297.4257	276.4055	-110
recta	389.723	499.34	276.4055	276.4055	
curva	499.34	548.656	276.4055	328.7316	60
recta	548.656	548.454	328.7316	328.7316	
curva	548.454	598.823	328.7316	275.3834	-60.107
recta	598.823	604.47	275.3834	275.3834	
curva	604.47	643.662	275.3834	298.0654	110
recta	643.662	740.732	298.0654	298.0654	
curva	740.732	774.529	298.0654	278.5059	-110.003
recta	774.529	915.685	278.5059	278.5059	
curva	915.685	1150.047	278.5059	218.8261	-250
recta	1150.047	1348.594	218.8261	218.8261	
curva	1348.594	1510.386	218.8261	321.8264	100
recta	1510.386	1521.14	321.8264	321.8264	
curva	1521.14	1633.151	321.8264	219.958	-70
recta	1633.151	1648.123	219.958	219.958	
curva	1648.123	1712.958	219.958	265.7441	90.148
recta	1712.958	1721.898	265.7441	265.7441	
curva	1721.898	1782.781	265.7441	304.3895	100.296
curva	1782.781	1886.997	304.3895	238.0984	-100.082
curva	1886.997	2004.362	238.0984	287.869	150.123
recta	2004.362	2158.244	287.869	287.869	

Tabla 7.13 Estado de alineaciones presentado en el proyecto constructivo

Como puede observarse, se trata de un trazado formado únicamente de rectas y curvas circulares, no presentando curva de transición alguna.

Para la restitución de la geometría del citado tramo de carretera, dos vehículos, equipados con 4 GPS cada uno, se desplazaron al tramo de la CV-660 y llevaron a cabo dos recorridos cada uno desde Ontinyent a Fontanars, y viceversa. En el primer recorrido (ida y vuelta) se llevó a cabo con una velocidad alrededor de 60 km/h, mientras que el segundo recorrido (ida y vuelta) se realizó a una velocidad

mayor, en el entorno de 80 km/h. De esta manera, se pretendía, no sólo comparar la geometría restituída con la procedente del proyecto, sino también evaluar la influencia de la velocidad en los resultados.

En la figura 7.63, se muestran los diagramas de azimuts obtenidos a partir de las trayectorias realizadas a las dos velocidades citadas, así como también el diagrama resultante de la unión de todas las trayectorias. A continuación, en la figura 7.64 se han representado los mismos diagramas pero desfasados (10 gonios el obtenido con velocidad 60 km/h y 20 gonios el correspondiente a la velocidad de 80 km/h), con el fin de, al no estar solapados, apreciar con mayor facilidad las diferencias.

En ellas, se aprecia cómo la diferencia entre los tres diagramas es mínima, quedando perfectamente definidos cada uno de los elementos que componen el trazado en todos ellos.

Sin embargo, sí que se observa cómo en el diagrama de azimut correspondiente a los datos tomados a una velocidad menor hay mayor ruido, especialmente en los tramos rectos, debido a la captura de un número mayor de datos. No obstante, la diferencia es mínima.

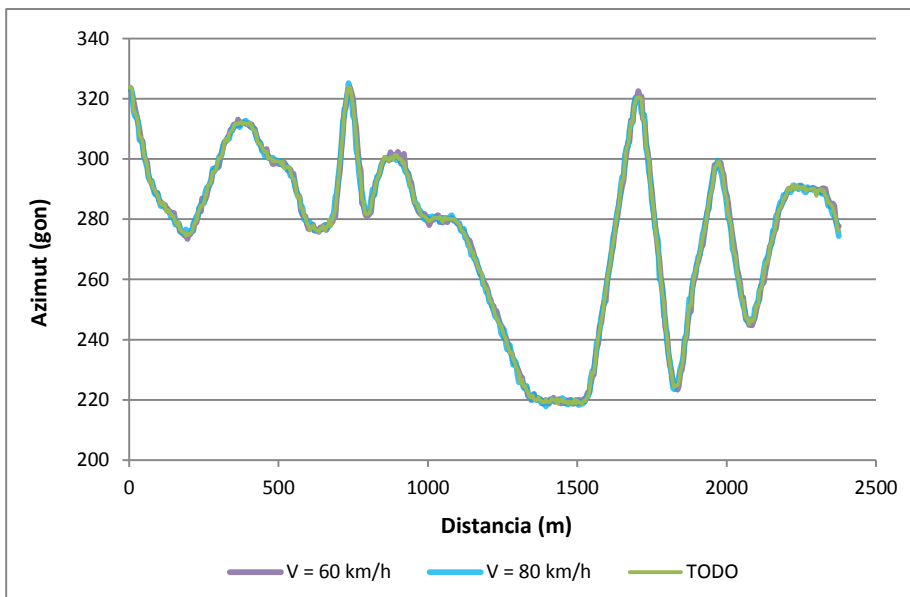


Figura 7.63 Diagrama de azimut del tramo de validación de la CV-660

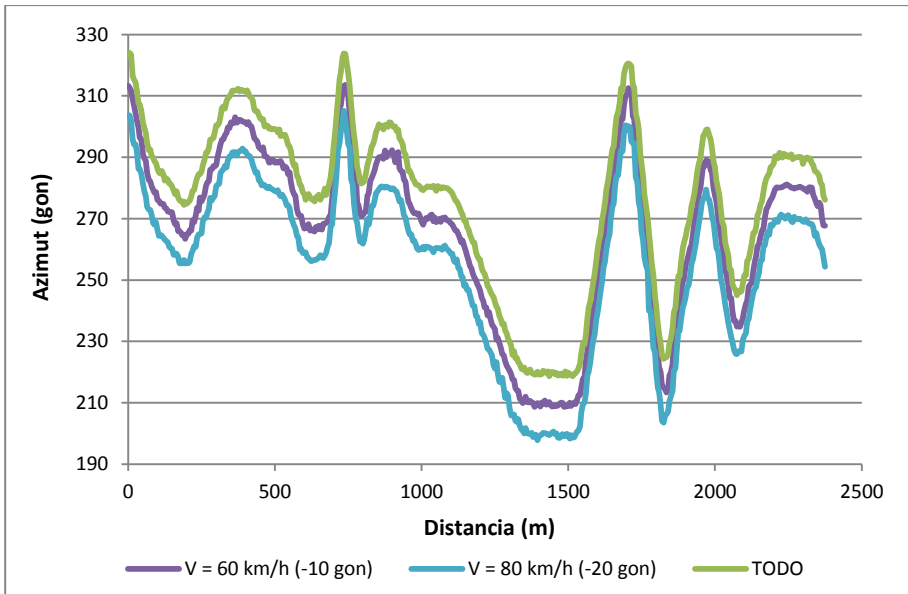


Figura 7.64 Diagramas de azimut desplazados del tramo de validación de la CV-660

Teniendo en cuenta los comentarios de los párrafos anteriores, para la comparación con el estado de alineaciones proporcionado por el proyecto constructivo, se ha utilizado el diagrama de azimut bruto y el diagrama de curvaturas bruto obtenido tras englobar todas las trayectorias realizadas.

El estado de alineaciones estimado mediante el procedimiento basado en el diagrama de curvaturas bruto se muestra en la tabla 7.14.

Alineación	PK inicio	PK final	Longitud	Radio	Parámetro
clotoide	0	15	15		167.0760
curva	15	115	100	242.6230	
clotoide	115	170	55		257.5378
recta	170	200	30		
clotoide	200	210	10		177.3527
curva	210	250	40	-283.0968	
clotoide	250	285	35		267.6381
recta	285	325	40		
clotoide	325	345	20		171.0889
curva	345	385	40	-187.2701	
clotoide	385	420	35		200.3468
recta	420	475	55		
clotoide	475	490	15		94.9300

curva	490	525	35	59.4108
recta	525	545	20	
clotoide	545	550	5	64.7895
curva	550	580	30	-64.7866
clotoide	580	595	15	78.1506
recta	595	615	20	
curva	615	635	20	150.0059
clotoide	635	670	35	177.2251
recta	670	700	30	
clotoide	700	715	15	182.1128
curva	715	735	20	-207.5061
recta	735	765	30	
curva	765	785	20	-394.7521
clotoide	785	800	15	193.3775
recta	800	880	80	
clotoide	880	920	40	269.6606
curva	920	1070	150	-243.5175
curva	1070	1125	55	-239.6771
clotoide	1125	1225	5	154.8150
recta	1225	1330	105	
clotoide	1330	1350	20	124.4061
curva	1350	1485	135	97.5971
recta	1485	1510	25	
clotoide	1510	1525	15	90.4806
curva	1525	1610	85	-68.7517
clotoide	1610	1655	45	134.2431
curva	1655	1690	35	90.7361
curva	1690	1760	70	120.9668
clotoide	1760	1795	35	161.6853
curva	1795	1850	55	-98.3452
clotoide	1850	1905	55	177.9670
curva	1905	1945	40	142.9099
clotoide	1945	2030	85	253.7972
recta	2030	2120	90	

Tabla 7.14 Estado de alineaciones estimado del tramo de la CV-660 mediante el diagrama de curvaturas

Por otra parte, el estado de alineaciones estimado mediante el procedimiento basado en el diagrama de azimuts bruto se muestra en la tabla 7.15.

Alineación	PK inicio	PK final	Longitud	Radio	Parámetro
clotoide	0	22	22		72.8728
curva	22	119	97	241.3845	
clotoide	119	174	55		115.2221
recta	174	199	25		
clotoide	199	221	22		77.3488
curva	221	225	4	-271.9475	
clotoide	225	303	78		145.6430
recta	303	309	6		
clotoide	309	359	50		97.3506
curva	359	385	26	-189.5430	
clotoide	385	415	30		75.4074
recta	415	474	59		
clotoide	474	501	27		40.6239
curva	501	527	26	61.1225	
clotoide	527	535	8		22.1129
recta	535	541	6		
clotoide	541	551	10		25.5708
curva	551	577	26	-65.3870	
clotoide	577	596	19		35.2470
recta	596	602	6		
clotoide	602	610	8		34.2617
curva	610	630	20	146.7337	
clotoide	630	666	36		72.6802
recta	666	696	30		
clotoide	696	737	41		85.4771
curva	737	762	25	-178.2034	
clotoide	762	767	5		29.8499
recta	767	768	1		
clotoide	768	770	2		24.3274
curva	770	771	1	-295.9132	
clotoide	771	801	30		94.2199
recta	801	875	74		
clotoide	875	936	61		121.8969

curva	936	1026	90	-243.5880	
clotoide	1026	1028	2		14593.5079
curva	1028	1106	78	-252.0005	0
clotoide	1106	1171	65		127.9845
recta	1171	1323	152		
clotoide	1323	1357	34		57.5641
curva	1357	1480	123	97.4598	
clotoide	1480	1512	32		55.8454
recta	1512	1515	3		
clotoide	1515	1517	2		11.7802
curva	1517	1617	100	-69.3874	
clotoide	1617	1625	8		23.5605
recta	1625	1637	12		
clotoide	1637	1638	1		10.4876
curva	1638	1759	121	109.9898	
clotoide	1759	1771	12		36.3301
recta	1771	1777	6		
clotoide	1777	1787	10		31.4161
curva	1787	1850	63	-98.6976	
clotoide	1850	1877	27		51.6220
recta	1877	1892	15		
clotoide	1892	1893	1		12.2031
curva	1893	1970	77	148.9167	
clotoide	1970	2019	49		85.4220
recta	2019	2112	93		

Tabla 7.15 Estado de alineaciones estimado del tramo de la CV-660 mediante el diagrama de azimuts

A partir de los tres estados de alineaciones anteriores, se han representado los correspondientes diagramas de curvaturas para observar más fácilmente las similitudes y diferencias (ver figura 7.65). La principal diferencia reside en la presencia de clotoides en las geometrías restituidas. Hay que tener en cuenta que las geometrías restituidas se han obtenido a partir de un número muy limitado de trayectorias realizadas por sólo dos conductores, por lo que la restitución se corresponde más con la trazada realizada por estos conductores que con la geometría de la carretera. Este error disminuye al incluir en la restitución las trayectorias realizadas por un número mayor de conductores.

Asimismo, se observa que las dos curvas unidas por una pequeña recta ubicadas en el entorno del PK 1+700 se han englobado en dos curvas consecutivas, en el caso

de la restitución a partir del diagrama de curvaturas, y en una única curva, en el caso de la restitución mediante el diagrama de azimuts.

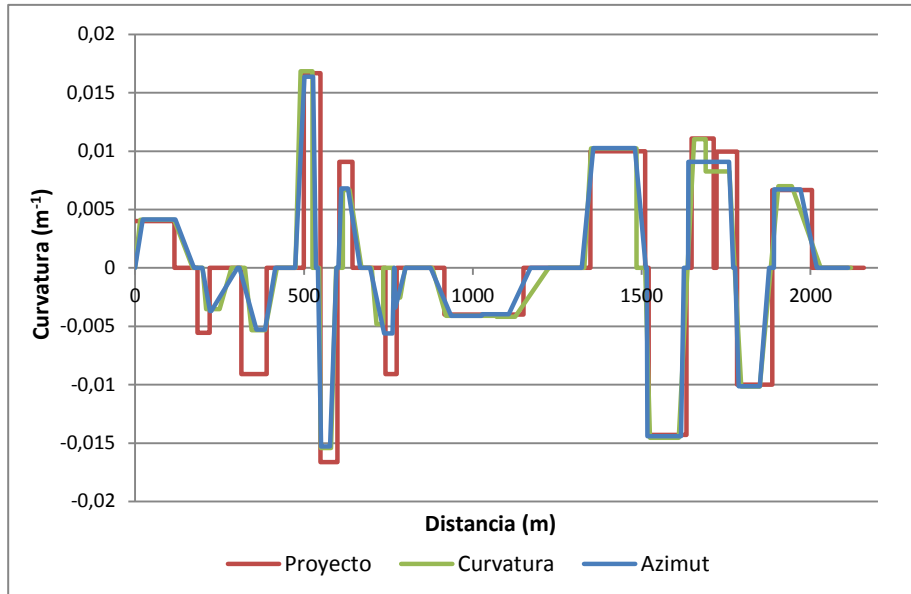


Figura 7.65 Diagrama de curvaturas estimado a partir de datos GPS vs diagrama de curvaturas del proyecto constructivo

Para un mejor análisis de las diferencias en los valores de los radios de las curvas circulares, se presenta el gráfico de la figura 7.66.

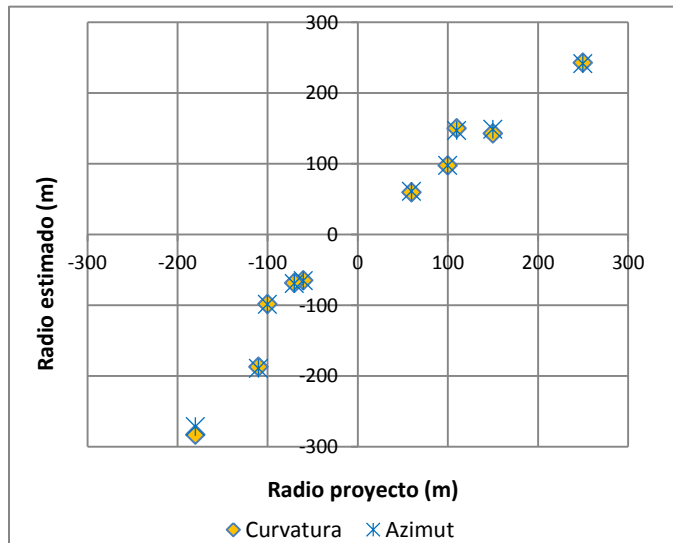


Figura 7.66 Radios obtenidos del proyecto vs radios obtenidos de la restitución

En esta figura se observa cómo los valores de los radios son muy similares a los del proyecto, salvo en las rectas con radio negativo de mayor valor. En ellas, el valor absoluto del radio es mayor en la restitución, debido a la geometría trazada por los conductores.

Con el objetivo de obtener una mejor visualización del grado de ajuste de las geometrías restituidas, a partir de los estados de alineaciones obtenidos, se ha grafiado la geometría en planta del tramo de carretera mediante un software de diseño de obras lineales. Las geometrías obtenidas se han superpuesto a una fotografía aérea del tramo. La figura 7.67 muestra el resultado de este proceso. En ella la geometría amarilla se corresponde con la geometría del proyecto, la magenta con la geometría obtenida a partir del diagrama de azimuts y la cian, con la geometría obtenida a partir del diagrama de curvaturas.

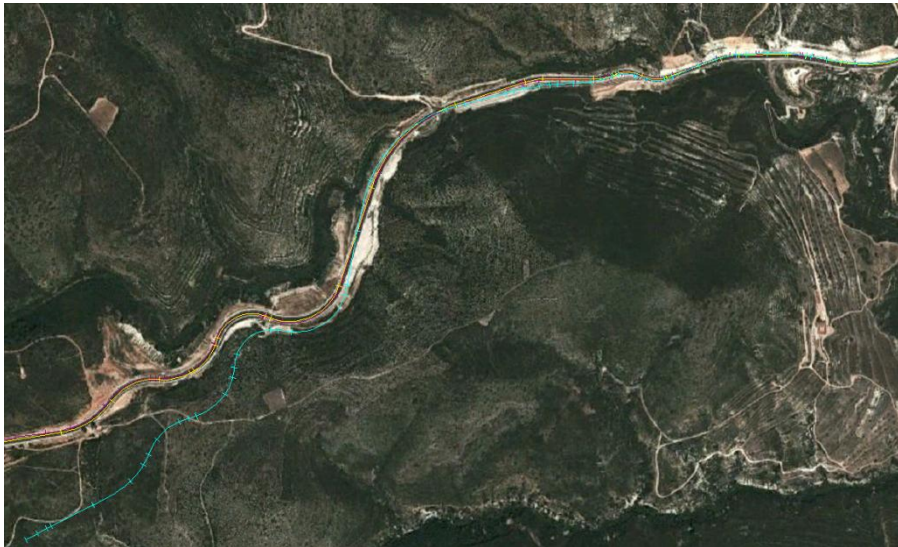


Figura 7.67 Restitución de las geometrías de validación sobre fotografía aérea [CV-660]

En ella se observa que, mientras la geometría obtenida a partir del diagrama de azimuts se adapta a la geometría de la carretera, a pesar de sus diferencias con la real debido al comportamiento de los conductores, la geometría obtenida a partir del diagrama de curvaturas presenta una desviación considerable de la geometría de la carretera, aunque las variaciones observadas en la figura 7.65 eran mínimas.

De hecho, la restitución elemento a elemento presenta resultados aceptables con ambas metodologías. Las variaciones en la geometría restituida a partir del diagrama de curvaturas son debidas a los pequeños errores acumulados a lo largo de los elementos consecutivos.

Por todo ello, se considera preferible utilizar la restitución de la geometría del trazado en planta obtenida a partir del diagrama de azimuts bruto.

Validación de los dispositivos GPS

La segunda validación consiste en la comparación de la geometría restituida de un tramo de carretera a partir de una trayectoria de ida y vuelta obtenida con tres dispositivos GPS con cadencia de toma de datos de 1 segundo y la geometría restituida de ese mismo tramo a partir de la trayectoria obtenida con un dispositivo GPS de 10 Hz.

El tramo de carretera en el que se ha llevado a cabo la toma de datos para la validación pertenece a la CV-35 y se localiza entre los municipios de Losa y Calles, coincidiendo con el tramo 2 estudiado.

El equipo receptor GPS de 10 Hz registra datos con una cadencia de 10 por segundo, con lo que la cantidad de datos disponible aumenta considerablemente. El receptor, que se encuentra integrado en la unidad de almacenamiento de datos, se complementa con una antena externa que, gracias al potente imán que dispone, puede fijarse en la parte superior del vehículo, para una mejor recepción (ver figura 7.68)



Figura 7.68 Antena del receptor GPS de 10 Hz

El GPS proporciona datos de longitud, latitud y altitud. En cuanto a la posición horizontal, según el fabricante, las lecturas obtenidas el 95 % del tiempo se encuentran dentro de un círculo de radio 5 m con centro en las coordenadas exactas, mientras que en el caso de la altitud el radio aumenta a 10 m, siendo constante para todos los puntos tomados en el mismo periodo temporal. Sin embargo, la precisión en la distancia es $\pm 0.05 \%$, con lo que, a pesar del error en cuanto a posicionamiento global, el error en posicionamiento relativo es mucho menor.

Llevando a cabo el proceso de restitución de la geometría de la carretera mediante el diagrama de azimuts con los dos conjuntos de datos, se obtienen los diagramas de curvaturas que se muestran en la figura 7.69. En ella, se incluye también el diagrama de curvaturas del tramo de carretera correspondiente del tramo 2 estudiado, restituido a partir de las trayectorias individuales obtenidas en la campaña de toma de datos.

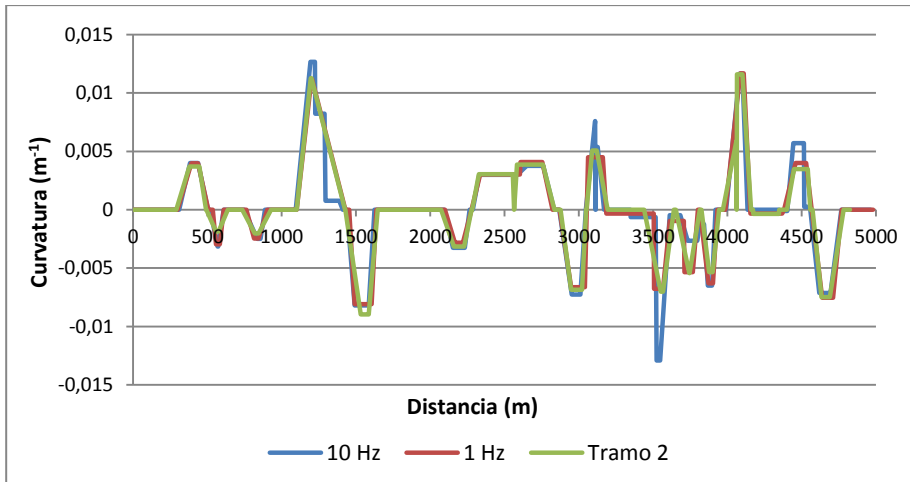


Figura 7.69 Diagrama de curvaturas GPS 10 Hz vs GPS 1 Hz vs tramo 2

Como puede observarse las principales diferencias se presentan en la zona de los 1300 metros y entre los 3000 y 4000 metros. Para estudiar con mayor detalle las causas de estas diferencias se ha recurrido a la observación de los diagramas de azimut brutos y netos (figura 7.70). Al superponerse, es complicado percibir las diferencias, por lo que en la figura se han representado los diagramas correspondientes al GPS de 10 Hz con un incremento de 20 gonios y los de 1 Hz con un decremento del mismo valor.

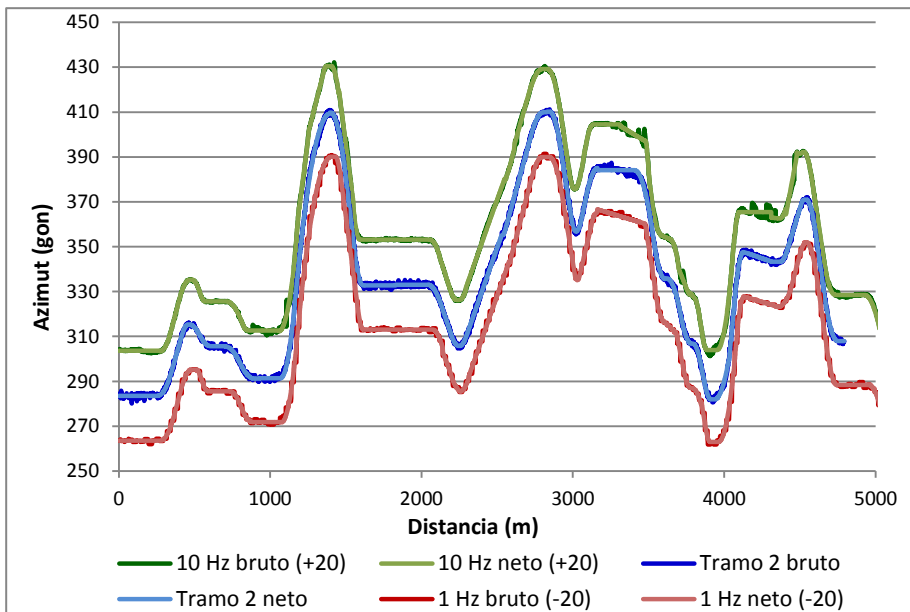


Figura 7.70 Diagrama de azimut bruto GPS 10 Hz vs GPS 1 Hz vs tramo 2

En las figuras 7.71 y 7.72 se muestran los detalles de las zonas mencionadas en las que las diferencias son más acusadas.

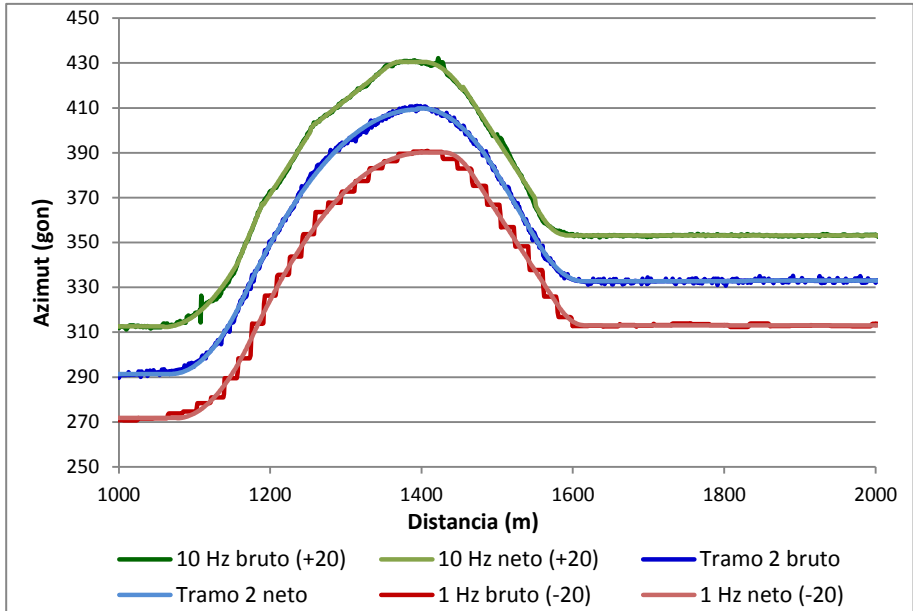


Figura 7.71 Diagramas de azimut GPS 10 Hz vs GPS 1 Hz vs tramo 2. Detalle 1

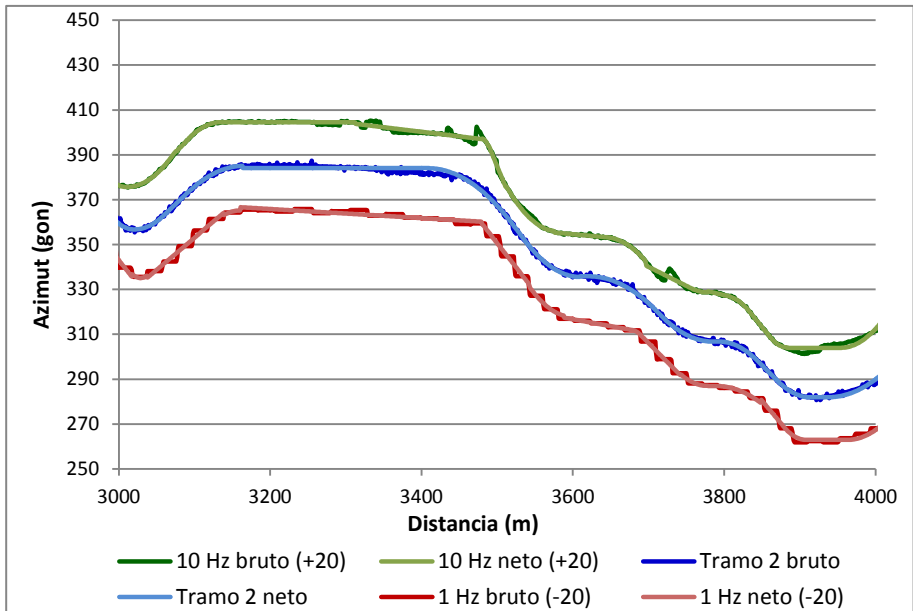


Figura 7.72 Diagramas de azimut GPS 10 Hz vs GPS 1 Hz vs tramo 2. Detalle 2

En las citadas figuras se observa, en primer lugar, cómo mientras que el azimut bruto procedente de los datos del GPS de 10 Hz aparece como un continuo, en el azimut bruto correspondiente a los datos de los GPS de 1 Hz aparecen pequeños escalones cuya envolvente se corresponde prácticamente con el diagrama del GPS de 10 Hz. Esto es debido a la diferencia en la cantidad de datos entre unos y otros que, obviamente, influye en el resultado.

Estos datos adicionales permiten, como se muestra en la figura 7.69, una mejor definición de las curvas con poco desarrollo y con radio amplio. De ahí las diferencias entre los dos diagramas de la figura. Sin embargo, esta deficiencia es solventada con un mayor número de trayectorias con conductores diferentes, como se ha planteado en la metodología de toma de datos. De hecho, en las figuras anteriores se observa claramente la mejora que se produce al utilizar una mayor cantidad de trayectorias, aunque estas se hayan tomado con GPS de 1 Hz.

Por tanto, en principio, podría entenderse que es preferible tener como dato una trayectoria con un GPS de 10 Hz que varias con GPS de 1 Hz. Sin embargo, esta gran cantidad de datos para un solo conductor, da como resultado en algunas zonas, generalmente rectas o curvas con desarrollo y radio amplios, una componente de ruido considerable, debido al propio comportamiento del conductor. Este ruido hace que la restitución no sea la adecuada sin un proceso de depuración de datos previo. Un ejemplo se recoge en la figura 7.72.

Además, esta mayor cantidad de datos hace que se refleje más el comportamiento del conductor que la geometría de la carretera. Este es el caso que aparece en la figura 7.71, donde, para los datos obtenidos con el GPS de 10 Hz, la restitución ha dado como resultado tres curvas circulares consecutivas, mientras que, para los datos obtenidos de los GPS de 1 Hz y de la toma de datos, el resultado es una sola curva con sus clotoides asociadas.

Como se ha realizado en el subapartado anterior, las tres geometrías restituidas se han grafiado en planta mediante un software de diseño de obras lineales. Asimismo, se ha restituido la geometría del mismo tramo con el mismo software a partir de un modelo digital del terreno. Las cuatro geometrías se han superpuesto sobre una fotografía aérea para poder evaluar visualmente el grado de ajuste de cada una de las restituciones. El resultado se recoge en la figura 7.73.

En ella, se muestra en magenta la geometría restituida a partir del modelo digital del terreno, en verde, la geometría restituida a partir de los datos obtenidos de la toma de datos del tramo 2 con un número elevado de trayectorias registradas mediante GPS de 1 Hz, en cian, la geometría restituida a partir de una única trayectoria de ida y vuelta con un GPS de 10 Hz y en amarillo, la geometría restituida a partir de una trayectoria de ida y vuelta obtenida con 3 GPS de 1 Hz.

Mientras que la geometría obtenida con la toma de datos en el tramo 2 se superpone prácticamente con la geometría restituida a partir del modelo digital del terreno, las otras dos restituciones presentan diferencias, más acusadas en el caso de la restitución a partir de un número limitado de GPS de 1 Hz.

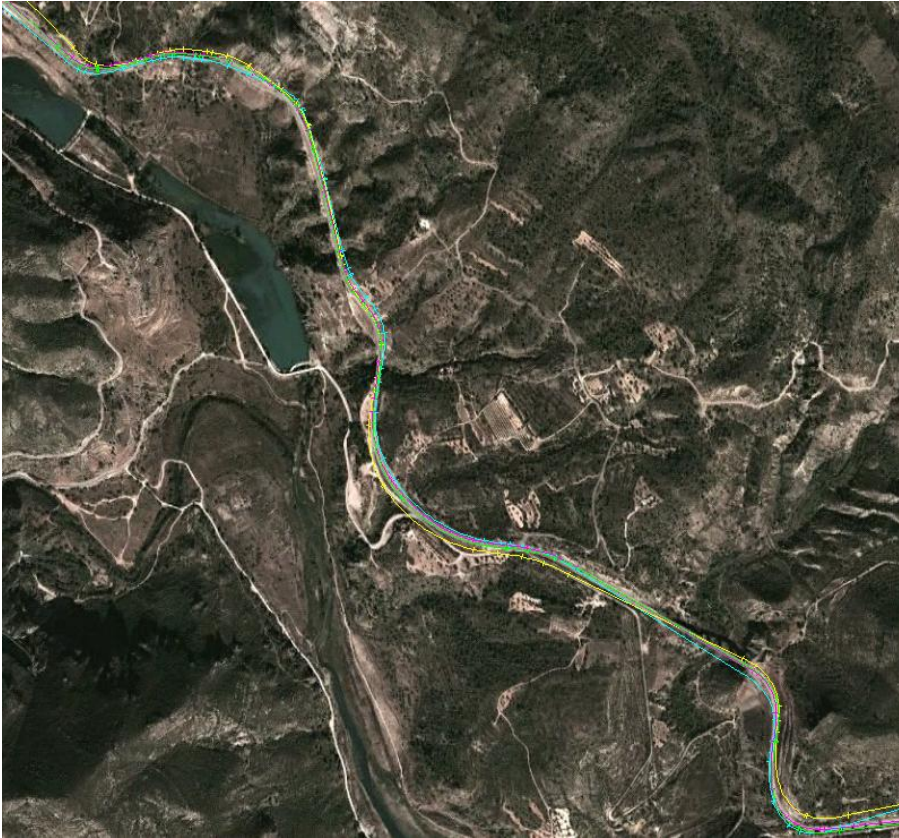


Figura 7.73 Restitución de las geometrías de validación sobre fotografía aérea [CV-35]

La conclusión de los procesos de validación de la metodología de restitución de la geometría llevados a cabo es que la metodología de restitución basada en el diagrama de azimuts puede considerarse un buen método de estimación de la geometría de la vía, siempre y cuando se cuente con un número considerable de trayectorias y de conductores diferentes. De esta forma, se consigue restituir la geometría de la carretera y no la trayectoria de operación del conductor, como ocurre al utilizar un GPS de mayor frecuencia de toma de datos equipado en un único vehículo.

7.2.2.5. Restitución de la geometría en alzado

Finalmente, para obtener el perfil longitudinal, se precisa conocer las cotas de cada uno de los puntos de la trayectoria media. Para ello, por cada punto de esta se traza una perpendicular y se identifican los puntos de corte con las trayectorias individuales iniciales, calculando la cota de estos como la interpolación entre las cotas de los puntos más próximos con altitud conocida.

Una vez conocida la cota de los puntos de las trayectorias individuales iniciales, se realiza la media y se identifica esa cota como la cota del punto correspondiente de la trayectoria media. Realizando este procedimiento para cada uno de los puntos de la trayectoria media es posible obtener el perfil longitudinal aproximado de la carretera. En la figura 7.74 se muestra el perfil longitudinal del tramo 1 estudiado. El resto de perfiles longitudinales se recogen en el anexo V.

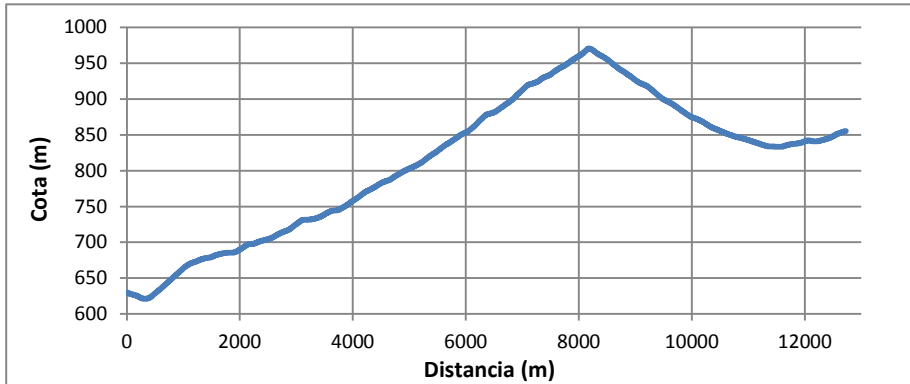


Figura 7.74 Perfil longitudinal del tramo 1: CV-35 [Tuéjar – Titaguas]

Sin embargo, en el trazado en alzado no se ha llevado a cabo una restitución tan minuciosa de la geometría como en el caso de la planta, distinguiendo entre las distintas rasantes y acuerdos. Esto es debido a que la precisión de los dispositivos GPS en cuanto a altitud no es muy fiable, por lo que se considera que el único dato que puede utilizarse para el estudio de las velocidades es la pendiente media obtenida como el cociente entre el incremento de cota y el incremento de distancia. Asimismo, en el estudio también se tiene en cuenta si el elemento estudiado se encuentra en la zona de un acuerdo convexo o cóncavo.

En el anexo V se presentan los perfiles longitudinales obtenidos junto con los diagramas de curvaturas correspondientes, de cada uno de los tramos de carretera en los que se ha tomado datos.

7.2.2.6. Cálculo de los perfiles continuos de velocidad

El objetivo y finalidad de este apartado es presentar el proceso a seguir para la obtención de la velocidad de operación a la que se ha circulado por cierto tramo de vía. Este procedimiento se basa en analizar el tiempo transcurrido entre dos coordenadas para calcular, a partir de los datos de espacio y tiempo, la velocidad.

Los pasos a seguir para la obtención de los perfiles individuales de velocidad para un tramo de carretera son:

1. Identificar la trayectoria individual para la que se quiere calcular el perfil de velocidad y la trayectoria media. Por un punto de la trayectoria media se traza una perpendicular a ella misma y se identifica el punto de corte con la trayectoria individual seleccionada.

2. Para el punto de corte de la trayectoria individual, se calcula el tiempo como interpolación lineal del tiempo registrado en los puntos dato anterior y posterior de la trayectoria individual.
3. Una vez se ha calculado el tiempo en el primer punto, se pasa al siguiente punto de la trayectoria media.
4. Desde ese nuevo punto, se calcula la perpendicular a la trayectoria media y se identifica el punto de corte con la trayectoria individual.
5. Para ese punto, se calcula el tiempo correspondiente como interpolación lineal de los tiempos registrados para el punto anterior y posterior de la trayectoria individual.
6. Con el incremento de tiempos obtenido entre esta iteración y la iteración anterior y la distancia (δ) entre puntos de la trayectoria, se calcula la velocidad correspondiente.

Repetiendo este procedimiento para todos los puntos de la trayectoria media para una trayectoria individual, se obtiene el perfil de velocidad para esa trayectoria tomando como referencia el intervalo de distancia entre Pk de la trayectoria media (δ).

El proceso debe repetirse para todas las trayectorias de los dos sentidos de circulación de cada tramo. Al finalizar, se dispondrá de un listado de las velocidades de cada una de las diferentes trayectorias individuales, todas ellas con el mismo intervalo de distancia entre Pk, por lo que serán fácilmente comparables. Además, así, a partir de estos perfiles individuales, es inmediato crear un perfil de velocidad promedio o de cualquiera de los distintos percentiles de la velocidad de operación. En la figura 7.75 se muestra un ejemplo de los perfiles de velocidad obtenidos para uno de los tramos de carretera estudiados.

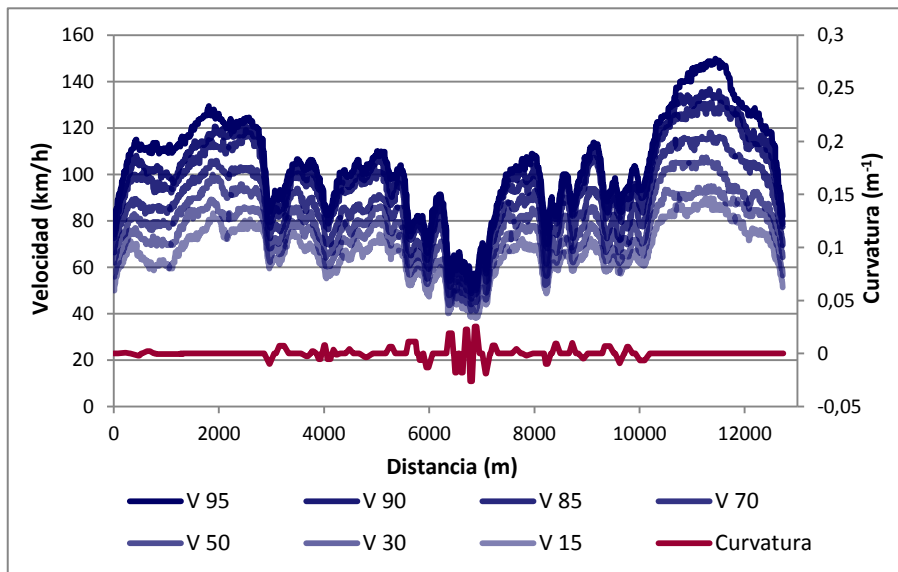


Figura 7.75 Perfil de velocidad – diagrama de curvaturas del tramo 1: CV-35 [Tuéjar – Titaguas]

En el anexo VI se presenta, para cada uno de los tramos de estudio, los perfiles continuos de velocidad correspondientes a los percentiles más representativos.

Como puede observarse en la descripción de la obtención de los perfiles de velocidad, el cálculo de la velocidad proyectada sobre la trayectoria media está basado en el tiempo registrado por el GPS en cada punto. Los dispositivos proporcionan también datos de velocidad pero únicamente en números enteros. Por ello, para obtener más precisión, se volvió a calcular la velocidad. Además, mientras que es complicado comprobar que la velocidad obtenida desde los GPS es correcta, la comprobación de la precisión en la toma de datos de tiempo puede realizarse sincronizando con el GPS un reloj digital y recogiendo el tiempo en el que se realizan determinadas maniobras, como una parada, en diferentes momentos para después compararlo con el grabado en el GPS.

No obstante, las velocidades calculadas mediante el procedimiento descrito se han comparado con las obtenidas con los GPS en una muestra de trayectorias individuales. Las diferencias encontradas son las debidas al redondeo de las velocidades de los GPS, cuyos valores no presentan decimales.

Comprobación de flujo libre

Del tratamiento de los datos, se han obtenido para cada uno de los tramos estudiados, además de las características geométricas de las alineaciones, los perfiles individuales de todos los conductores y los perfiles de los distintos percentiles de la velocidad de operación obtenidos a partir de ellos.

Al comienzo del proceso del tratamiento de los datos y a lo largo de él ya se han realizado distintas depuraciones de los datos. Sin embargo, para el análisis objeto de esta investigación hay que considerar únicamente los vehículos que circulan en flujo libre, es decir, con una separación entre ellos de, al menos, 5 segundos. Con ello, se persigue que el vehículo analizado no se encuentre condicionado por el vehículo precedente. Por tanto, una vez se dispone de los perfiles individuales de velocidad, con el fin de garantizar que los datos cumplen con las citadas condiciones, es necesario llevar a cabo una comprobación de flujo libre.

Esta comprobación consiste en un estudio comparativo entre cada uno de los perfiles individuales y los diferentes perfiles de percentiles de velocidad obtenidos.

Tras la observación de todos los perfiles individuales, se eliminan todas las trayectorias (o parte de ellas) que presentan comportamientos en la velocidad inusuales. Un ejemplo de un perfil de velocidad individual inusual es aquel en el que se presenta una reducción en la velocidad mucho mayor que la reducción en la velocidad detectada en los perfiles de los percentiles para ese tramo. Una situación de este tipo se muestra en la figura 7.76.

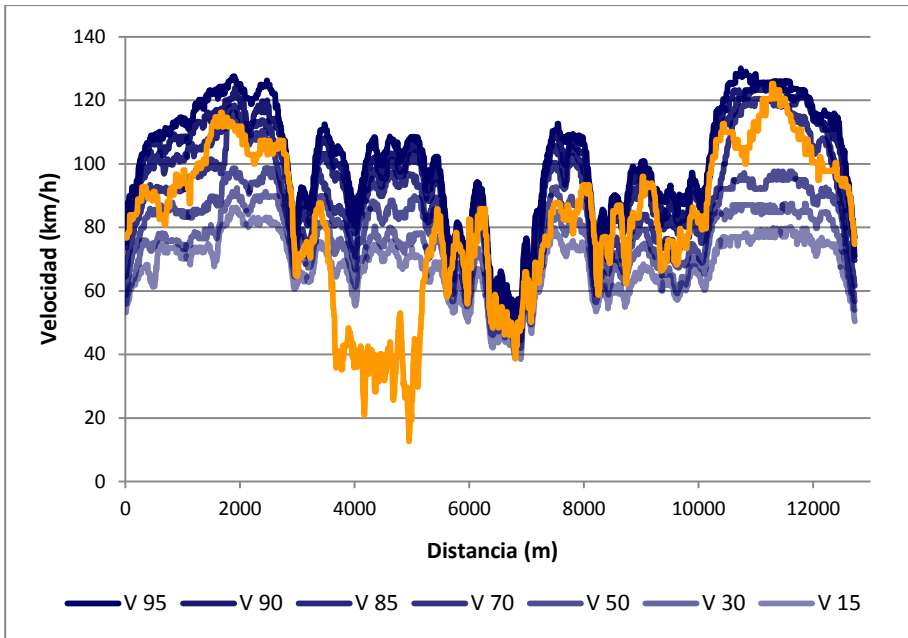


Figura 7.76 Ejemplo de perfil de velocidad de un vehículo condicionado

Como puede observarse, en el entorno de los 4000 metros, el perfil presenta un tramo con velocidad considerablemente inferior a la que cabría esperar a partir de la observación de los percentiles de la zona. Como se ha explicado en la metodología seguida en la toma de datos, mediante la encuesta realizada en el control de entrega del GPS se garantizaba un intervalo suficiente entre un vehículo y el siguiente, con el fin de facilitar las condiciones de flujo libre. Sin embargo, los tramos de carreteras se encontraban frecuentemente próximos a zonas rurales por lo que la presencia esporádica de vehículos agrícolas circulando a velocidades bajas era inevitable. Esta situación es la principal causa de condicionamientos en los tramos de toma de datos. En el caso citado, se eliminarían del estudio los datos de velocidad individual comprendidos, aproximadamente, entre los 3000 y los 5500 metros.

Una vez eliminadas las trayectorias defectuosas, o una parte de ellas en el caso de que el defecto esté localizado y no tenga efecto en el resto del tramo, se vuelven a calcular los perfiles de los distintos percentiles.

De esta forma, se dispone, para todos los tramos, de las características geométricas de las alineaciones y de los perfiles correspondientes a la distribución agregada de la velocidad, calculados a partir de los perfiles de velocidad individuales de vehículos ligeros circulando en condiciones de flujo libre.

7.3. ANÁLISIS

En general, la operación de los vehículos se puede caracterizar por su perfil de velocidad, obtenido de los ensayos de campo. Con estos perfiles, es posible obtener modelos que permitan predecir el comportamiento de los conductores a lo largo de un trazado, en función de las características geométricas del mismo. De esta forma, los modelos, que se obtendrán a continuación, se convierten en una herramienta fundamental para la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de carreteras.

Asimismo, a partir de los perfiles continuos de velocidad se estudiará el estilo de conducción de los conductores, analizando las diferentes velocidades, aceleraciones y deceleraciones individuales, correlacionándolas con las características propias del conductor, del vehículo e incluso del viaje. Esta información es esencial en el ámbito de la seguridad vial y especialmente importante como base para el diseño de campañas de concienciación y de educación vial.

Ambos análisis se llevarán a cabo tanto para alineaciones curva y recta, como para las aceleraciones y deceleraciones que se producen en secciones de transición curva-recta y recta-curva, respectivamente. Finalmente, con los modelos desarrollados, se establecerán una serie de reglas para la construcción de perfiles de velocidad estimados en función de las características geométricas del trazado. Estas reglas se aplicarán a todos los tramos de carretera de la toma de datos y los resultados se compararán con el perfil estimado según los modelos del IHSDM y los perfiles de velocidad continuos empíricos.

7.3.1. Análisis de la velocidad en secciones curva

La mayor parte de los estudios relacionados con la velocidad en alineaciones curva y los modelos de estimación de la velocidad de operación en estas secciones, se basan y se calibran a partir de datos puntuales de velocidad, tomados en el punto medio de la curva, considerando que es en ese punto en el que se produce la velocidad mínima.

En el presente estudio, gracias a la disponibilidad de perfiles continuos de velocidad para cada uno de los conductores observados, se comprobará si esta hipótesis es estadísticamente aceptable. En función de los resultados, se determinará qué valor de la velocidad utilizar para los diferentes estudios a realizar.

Estos estudios consistirán en la modelización de la velocidad de operación en función de las características geométricas de la carretera y en el análisis de las velocidades individuales elegidas y desarrolladas.

7.3.1.1. Secciones curva a estudiar

Tras el estudio detallado de cada uno de los tramos presentados, se eligieron, para el estudio de la velocidad mínima desarrollada por los conductores en las secciones curva, las alineaciones que se muestran en la tabla 7.16.

Esta elección está basada en la necesidad de que en una curva se produzca un mínimo de velocidad sin la influencia de curvas adyacentes que pudieran tergiversar los resultados. Para ello, debido a la gran casuística posible ha sido necesario analizar el perfil de velocidad curva a curva.

Así, se puede considerar que las curvas elegidas se comportan como curvas aisladas.

Curva	Radio (m)	Pk inicio	Pk final	Angulo deflexión (gon)	Longitud (m)	Pendiente
C01I01	102	2862	3049	59.436	101	0.055
C01I02	158	5179	5354	44.259	111	0.057
C01I03	90	5558	5765	122.643	182	0.053
C01I04	52	6326	6459	119.220	107	0.034
C01I05	142	9292	9511	71.008	141	-0.063
C01I06	156	9919	10192	75.360	181	-0.036
C01V01	158	5354	5179	44.259	109	-0.057
C01V02	155	10192	9919	75.360	187	0.036
C03I01	297	2658	2837	22.477	104	0.014
C03I02	256	3272	3515	39.337	154	0.013
C03V01	297	2837	2658	22.477	104	-0.014
C03V02	256	3515	3272	39.337	162	-0.013
C04I01	242	1767	2050	47.119	170	-0.009
C04I02	645	2480	2773	16.337	154	-0.013
C04I03	443	3186	3519	33.092	246	0.015
C04I04	253	4037	4310	47.645	204	-0.028
C04V01	293	1656	1231	73.236	364	0.036
C04V02	242	2050	1767	47.119	186	0.009
C04V03	645	2773	2480	16.337	175	0.013
C05I01	97	628	749	44.135	72	-0.028
C05I02	87	1226	1350	52.233	72	0.006
C05I03	214	1535	1718	27.282	85	0.004
C05I04	200	2933	3085	28.854	92	-0.004
C05I05	194	3432	3554	22.615	69	-0.044
C05V01	97	749	628	44.135	62	0.028
C05V02	87	1350	1226	52.233	70	-0.006
C05V04	200	3085	2933	28.854	88	0.004
C05V05	194	3554	3432	22.615	68	0.044
C06V01	168	2531	2302	65.098	183	-0.017

C06V02	518	3184	3005	11.413	88	0.028
C07I01	236	1610	1813	37.280	151	0.030
C07I02	222	4969	5139	29.424	94	0.038
C07I03	215	5387	5552	27.591	81	-0.014
C07I04	242	5647	5856	34.588	118	-0.014
C07I05	286	6634	6788	17.885	86	-0.025
C07I06	294	7015	7165	19.678	90	-0.015
C07V01	236	1813	1610	37.280	123	-0.030
C07V02	383	3070	2827	20.678	55	-0.013
C07V04	222	5139	4969	29.424	110	-0.001
C07V05	215	5552	5387	27.591	105	0.014
C07V06	242	5856	5647	34.588	145	0.014
C07V07	286	6788	6634	17.885	74	0.025
C07V08	294	7165	7015	19.678	90	0.015
C08I01	195	1751	1855	20.954	63	0.003
C08I02	105	2577	2673	33.022	49	-0.003
C08I03	163	4579	4692	22.444	67	0.005
C08I04	138	5068	5170	26.956	61	0.003
C08V01	83	254	161	44.199	59	0.003
C08V02	196	1855	1751	20.954	64	-0.003
C08V03	105	2673	2577	33.022	58	0.003
C08V04	806	3782	3628	7.540	107	-0.000
C08V05	163	4692	4579	22.444	47	-0.005
C08V06	138	5170	5068	26.956	54	-0.003
C09I01	125	2559	2673	35.295	66	0.012
C09I02	152	5961	6088	28.940	57	-0.037
C09V01	484	796	577	15.585	110	0.001
C09V02	152	6088	5961	28.940	81	0.037
C10I01	261	530	669	17.953	64	-0.009
C10I02	208	1102	1276	26.914	89	-0.015
C10I03	189	2341	2530	32.223	88	-0.004
C10I04	149	3046	3182	33.429	68	-0.019
C10V01	261	669	530	17.953	83	0.009
C10V02	208	1276	1102	26.914	87	0.015
C10V03	189	2530	2341	32.223	103	0.004

Tabla 7.16 Características geométricas de las curvas utilizadas en el estudio

El estudio realizado ha dado como resultado la elección de 64 curvas cuyo comportamiento puede considerarse aislado, todas ellas con clotoides. El rango de pendientes en el que se encuentran varía entre +6 % y -6 %, por lo que se cubre un ámbito mayor que en la mayoría de las investigaciones en las que se reducía a ± 4 %.

En cuanto a sus características geométricas, en la tabla 7.17 se presentan los intervalos entre los que varían las más representativas. En el anexo VII se muestra el resto de características geométricas de las curvas evaluadas.

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
Radio (m)	52	806	230.95	139.25
Longitud (m)	47	364	108.40	55.34
Ángulo deflexión (gon)	7.54	122.64	36.31	21.79
Parámetro clotoide (m)	37	300	124.89	50.46

Tabla 7.17 Rangos de las principales características geométricas de las curvas

Comparando estos valores con los resultantes del estudio de la Instrucción de Carreteras Española Norma 3.1-I.C (2000) para carreteras del Grupo 2, se pueden realizar las siguientes consideraciones:

- El rango para los radios de curvas de carreteras del Grupo 2 que aparece en la tabla 4.4 de la Instrucción varía entre 50 m y 670 m. Por lo que podría asumirse que los valores de radio más utilizados quedan contemplados por los mostrados en la muestra del estudio.
- 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 gonios y 9 gonios, y sólo excepcionalmente valores inferiores a 9 gonios. En el caso de valores excepcionales de ángulos de deflexión, la norma marca, en sus tablas 4.9 y 4.10, los radios a utilizar y el desarrollo mínimo de las curvas en función del ángulo girado. En la muestra del estudio se reflejan 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 44.6 m y 245.1 m. En la muestra de estudio este rango queda cubierto.

Tras estudiar la muestra utilizada para la modelización de la velocidad en curvas en investigaciones anteriores (tabla 7.18), se considera esta muestra suficiente para el rango del estudio. No obstante, hay ciertas casuísticas que no están cubiertas con las curvas seleccionadas, como radios amplios y ángulos de deflexión reducidos.

	Muestra
Islam y Seneviratne (1994)	8
Passetti y Fambro (1999)	39
McFadden y Elefteriadou (2000)	21

Schurr et al. (2002)	40
Bella (2005)	10
Castro et al. (2008)	18
Castro et al. (2011)	22

Tabla 7.18 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en curva

7.3.1.2. Variables consideradas en el estudio de la velocidad en curvas

En el presente apartado se hace una relación de las variables a considerar en el estudio de la velocidad en las alineaciones curvas. Para ello, las variables se dividen en dos tipologías, las propias de la geometría del trazado, obtenidas tras la restitución de la geometría de los diferentes tramos, y las variables relacionadas con el conductor, el vehículo y el viaje, que se han obtenido de las encuestas.

Variables relacionadas con la geometría del trazado

Las variables relacionadas con la geometría del trazado de la carretera se pueden clasificar como sigue:

- Curva:
 - Sentido de giro de la curva: horario/antihorario
 - Longitud de la curva (m): L_C
 - Ángulo de deflexión (gon): γ
 - Tasa de cambio de curvatura de la curva, incluyendo a la curva circular y las curvas de transición (gon/km): CCR_C
 - Pendiente (tanto por uno): p
 - 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 anterior/posterior:
 - Longitud de la recta (m): L_R
- Tramo:
 - Tasa de cambio de curvatura del tramo en el que se encuentra (gon/km): CCR
 - Tasa de cambio de curvatura considerando la recta anterior y la curva (gon/km): CCR_{R-C}
 - Tasa de cambio de curvatura considerando la curva y las rectas adyacentes (gon/km) : CCR_{R-C-R}
 - Tasa de cambio de curvatura de los 100 metros anteriores al inicio de la curva circular (gon/km): $CCR_{100inicio}$
 - Tasa de cambio de curvatura de los 200 metros anteriores al inicio de la curva circular (gon/km): $CCR_{200inicio}$

- Tasa de cambio de curvatura de un tramo de 100 metros centrado en el punto medio de la curva (gon/km): CCR_{ctro}

De las anteriores variables, merecen especial explicación las tasas de cambio de curvatura, generalmente representadas por las siglas CCR por su nomenclatura en inglés "Curvature Change Ratio". La ecuación 66 muestra su cálculo.

$$CCR_i = \frac{|\gamma_i|}{L_i} \quad (66)$$

Donde:

CCR_i : tasa de cambio de curvatura del tramo i (gon/km).

γ_i : ángulo girado en el tramo i (gon).

L_i : longitud del tramo i (km).

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

En cuanto al cálculo de la tasa de cambio de curvatura del tramo en el que se encuentra, requiere la tramificación de la carretera en función de este criterio. Esta metodología de tramificación consiste en realizar un gráfico del ángulo de deflexión acumulado en función de la distancia. Se identifican como límites de los tramos cada uno de los cambios de tendencia del gráfico. Así, en la figura 7.77 se muestra la tramificación llevada a cabo para el tramo de toma de datos 1.

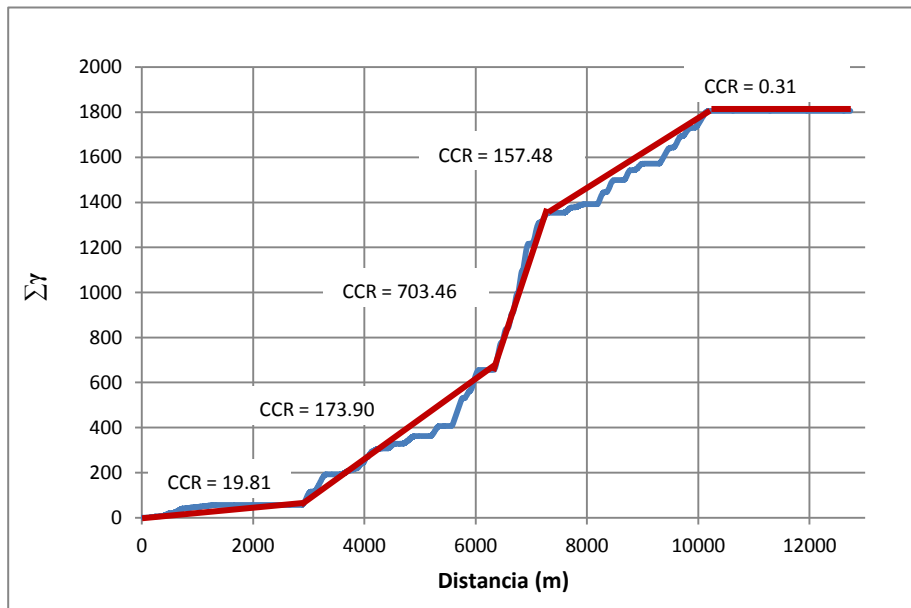


Figura 7.77 Tramificación según el CCR del tramo 1: CV-35 [Tuéjar - Titaguas]

Los resultados de la tramificación llevada a cabo para cada uno de los tramos de carretera de estudio se muestran en el anexo V.

Se ha llevado a cabo un estudio de la correlación existente entre las diferentes variables. La matriz resultante completa se encuentra en el anexo VIII. En ella, puede observarse cómo las mayores correlaciones se producen entre el radio de la curva y el parámetro de la clotoide, la tasa de cambio de curvatura de la curva y el ángulo de deflexión, con una correlación de 92 %, 73 % y 48 %, respectivamente. Estas relaciones se muestran en la figura 7.78.

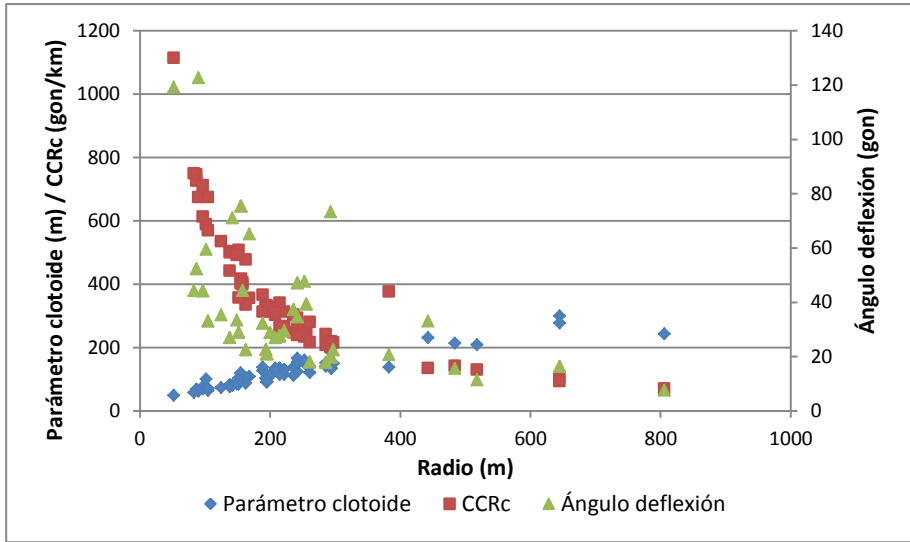


Figura 7.78 Relación del radio con el parámetro de la clotoide, el CCRc y el ángulo de deflexión. Asimismo, se ha detectado una correlación del 61 % entre la tasa de cambio de curvatura y el ángulo de deflexión (ver figura 7.79).

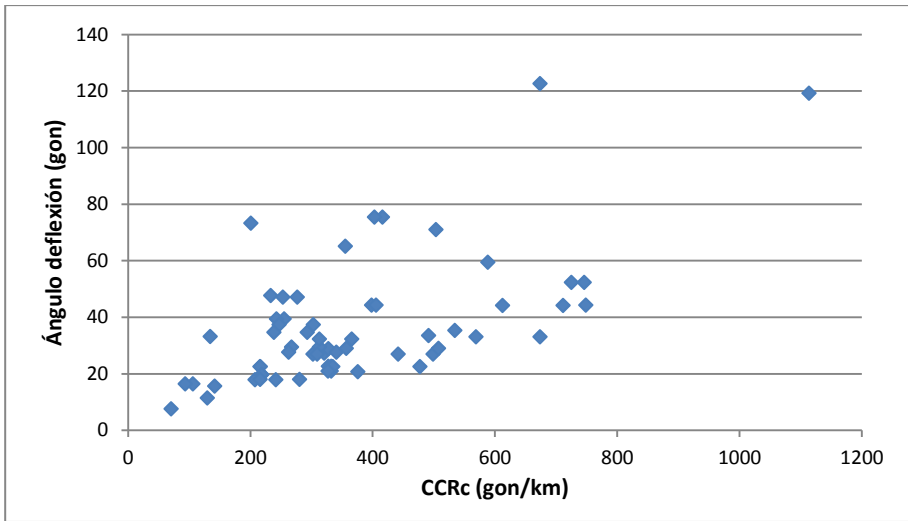


Figura 7.79 Relación del CCRc y el ángulo de deflexión

Variables relacionadas con el conductor, el vehículo y el viaje

De los datos procedentes de las encuestas realizadas a los conductores durante las jornadas de toma de datos, se han obtenido las siguientes variables para el análisis de la velocidad:

- Conductor:
 - Sexo del conductor: hombre/mujer.
 - Edad del conductor (años).
 - Kilómetros conducidos al año: pocos/medio/muchos.
- Viaje:
 - Longitud del viaje: largo/medio/corto/ruta.
 - Frecuencia del viaje: habitual/no habitual.
 - Propósito del viaje: laboral/no laboral.
- Ocupantes:
 - Número de niños.
 - Número de adultos.
 - Número de ancianos.
- Vehículo:
 - Tipo de vehículo: turismo/todoterreno/monovolumen/furgoneta.

Únicamente se muestra una relación de las diferentes variables ya que su descripción ya se ha realizado en el apartado de tratamiento de datos.

7.3.1.3. Distribución de la velocidad en secciones curva

Una de las hipótesis que suele asumirse en los estudios relacionados con la velocidad desarrollada en un tramo de carretera es que en una sección de la vía la distribución de velocidades puede considerarse normal. Esta hipótesis permite llevar

a cabo los procedimientos estadísticos más habituales. En la figura 7.80 se muestra un esquema de la distribución normal.

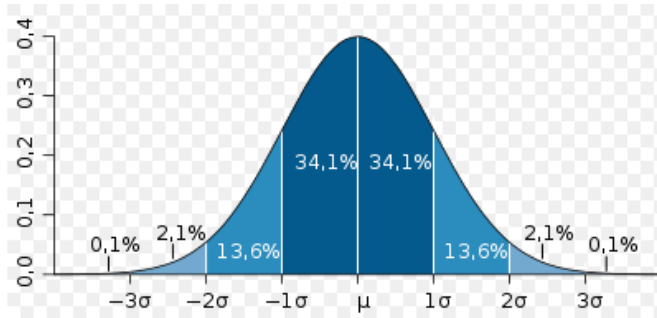


Figura 7.80 Esquema de la distribución normal

Suponiendo que, en cada sección de la vía, la distribución de velocidades se comporta de forma normal, en el rango comprendido entre la media y más/menos dos veces la desviación típica se englobarán el 95,4 % de todos los datos.

En el presente trabajo de investigación, la hipótesis se mantendrá. Sin embargo, antes de comenzar el análisis basado en la normalidad de los datos, se ha comprobado en qué grado la hipótesis es cierta.

Para ello, se ha analizado la distribución de velocidad en la sección central de las curvas circulares utilizadas en el estudio. Para cada una de ellas se ha realizado un gráfico en el que se representa tanto el histograma de los datos (en frecuencia relativa para facilitar la visualización), como la distribución normal y la distribución normal acumulada, correspondientes al ajuste de la distribución normal para la media y la desviación típica de los datos en cada caso. La figura correspondiente a cada una de las secciones estudiadas se encuentran en el anexo VIII. En la figura 7.81 se muestra, como ejemplo, la correspondiente a la curva C01101, es decir, a la primera curva evaluada en el sentido de ida del primer tramo de carretera evaluado.

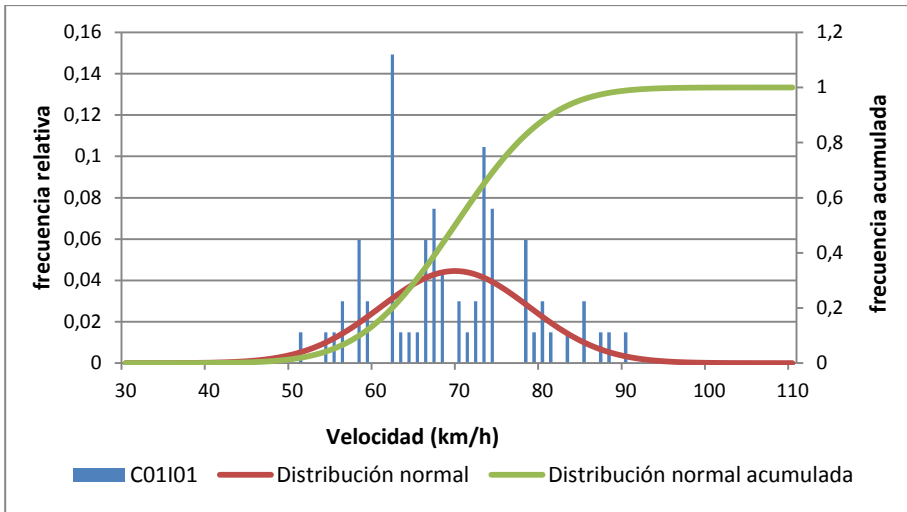


Figura 7.81 Distribución de velocidad en la sección central de la curva C01101

Con estas figuras se puede intuir el ajuste de los datos a una distribución normal, sin embargo, no se puede establecer con seguridad si el ajuste es bueno o no, ya que dependiendo de los intervalos utilizados para el dibujo del histograma la apariencia puede variar significativamente.

Para una mejor aproximación al análisis de normalidad de los datos, se ha realizado un estudio de la variable velocidad en cada una de las secciones, obteniendo los parámetros: recuento, promedio, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación, mínimo, máximo, rango, sesgo estandarizado y curtosis estandarizada. Estos estadísticos incluyen medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. En el caso del estudio de la normalidad de los datos, son de particular interés el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, que pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a $+2$ indican desviaciones significativas de la normalidad. En el anexo VIII se recoge una serie de tablas con los resultados para cada una de las secciones.

De las 64 secciones centrales de curva evaluadas, sólo 34 presentan valores de sesgo y curtosis dentro del rango. Sin embargo, únicamente 14 (21 % de las secciones) presentan valores fuera del rango $(-3,+3)$.

Con el fin de completar el estudio de si la variable puede modelarse adecuadamente con una distribución normal, se ha llevado a cabo la prueba de Shapiro-Wilk, basada en la comparación de cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos, y la prueba de chi-cuadrado en la que se divide el rango de la variable en una serie de clases igualmente probables y se compara el número de observaciones en cada clase con el número esperado de observaciones. Los resultados de las pruebas se encuentran en el anexo VIII.

En ambas pruebas, en los casos en los que el valor-P es mayor o igual a 0.05, no se puede rechazar la hipótesis de que la variable proviene de una distribución normal con 95 % de confianza.

De las 64 secciones, en 43 (67 %) curvas se puede aceptar la normalidad de los datos según alguna de las dos pruebas con un 95 % de confianza. De las restantes, en 9 secciones se puede aceptar con un 90 % de confianza. Con todo ello, en 81 % de los casos se puede aceptar que la variable velocidad se puede modelar según una distribución normal. Por tanto, se acepta como válida la normalidad de la velocidad en secciones curva.

Para finalizar con este apartado, se va a estudiar si la muestra de vehículos tomada en cada una de las secciones es suficientemente representativa, considerando la desviación típica calculada en cada una de ellas. Para ello, se calculará la muestra necesaria según la ecuación 67.

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 \cdot \sigma^2}{e^2} \tag{67}$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$: tiene el valor de 1.96 para el 95 % de confianza

σ : desviación típica

e : diferencia con la verdadera media asumido. En este caso se asumirá 5 km/h

En la tabla 7.19 se muestra para cada una de las curvas, la muestra necesaria y la muestra real.

	C03I01	C03I02	C03I03	C03I04	C03I05	C03I06	C03V01	C03V02	
Muestra necesaria	12	22.	15	6	17	21	18	16	
Muestra real	67	67	67	66	67	67	85	84	
C07I01	C07I02	C07V01	C07V02	C08I01	C08I02	C08I03	C08I04	C08V01	C08V02
19	13	22	15	16	25	24	18	13	14
95	95	87	83	106	110	108	102	78	83
C08V03	C10I01	C10I02	C10I03	C10I04	C10I05	C10V01	C10V02	C10V04	C10V05
19	9	6	14	20	24	9	9	15	15
85	74	74	71	69	68	103	104	104	101
C11V01	C11V02	C12I01	C12I02	C12I03	C12I04	C12I05	C12I06	C12V01	C12V02
9	17	15	13	138	12	14	13	12	14
88	92	58	55	52	52	52	50	73	71

C12V04	C12V05	C12V06	C12V07	C12V08	C13I01	C13I02	C13I03	C13I04	C13V01
18	19	16	20	18	12	7	12	13	8
73	68	68	74	76	98	98	95	96	87
C13V02	C13V03	C13V04	C13V05	C13V06	C14I01	C14I02	C14V01	C14V02	C15I01
13	10	24	16	14	5	11	22	12	10
87	87	85	87	85	54	55	47	50	68
C15I02	C15I03	C15I04	C15V01	C15V02	C15V03				
9	8	6	11	8	11				
72	63	65	51	52	50				

Tabla 7.19 Muestra necesaria vs muestra real en secciones curva

En todos los casos la muestra de datos tomada es suficiente para la desviación típica que se ha obtenido, asumiendo un error de 5 km/h. Se ha comprobado que, incluso para un error de 3 km/h, la muestra sería suficiente en todos los casos.

7.3.1.4. Modelización de la media de la velocidad en secciones curva

Asumiendo la hipótesis de normalidad de los datos, será posible estimar la distribución de velocidad en una sección de carretera a partir de la media y la desviación típica de la distribución en ese punto, así como cualquier estadístico asociado, como los percentiles.

Por ello, el objetivo de este apartado es calibrar un modelo que permita estimar la media de la distribución de velocidades en una sección curva en función de las características geométricas del trazado.

Los valores de velocidad utilizados para esta calibración se han calculado, para cada una de las curvas mencionadas anteriormente, como el promedio de las velocidades medias calculadas en intervalos de 5 metros en la curva circular.

Influencia de las variables relacionadas con la geometría del trazado

Se ha estudiado, mediante un análisis de correlación, la influencia de cada una de las características geométricas del trazado, citadas al inicio de este apartado, con la media de la velocidad en las curvas estudiadas.

En la tabla 7.20 se muestran los resultados del análisis de correlación para las variables en las que la correlación con la media es significativamente diferente de cero, con un nivel de confianza del 95 %.

	correlación	tamaño muestra	Valor-p
A clotoide 1	0.4802	64	0.0001
A clotoide 2	0.4698	64	0.0001
Radio curva	0.4582	64	0.0001
Longitud curva	0.4399	64	0.0003

Longitud curva circular	0.3938	64	0.0013
Longitud clotoide 1	0.3175	64	0.0106
Longitud clotoide 2	0.2921	64	0.0192
$CCR_{100\text{ctro}}$	-0.3182	64	0.0104
$CCR_{100\text{inicio}}$	-0.3712	64	0.0025
CCR_C	-0.4682	64	0.0001

Tabla 7.20 Resultados del análisis de correlación de la velocidad media en curvas

De los resultados se desprende que las variables que más correlación muestran con la velocidad media son los parámetros de las clotoides adyacentes. Las clotoides suelen ser simétricas, por lo que es lógico que si una de ellas presenta correlación, la presenten las dos. Sin embargo, en el análisis únicamente se considera la clotoide anterior a la curva circular. En la figura 7.82, se muestra la relación entre el parámetro de la clotoide anterior y la velocidad media en la curva.

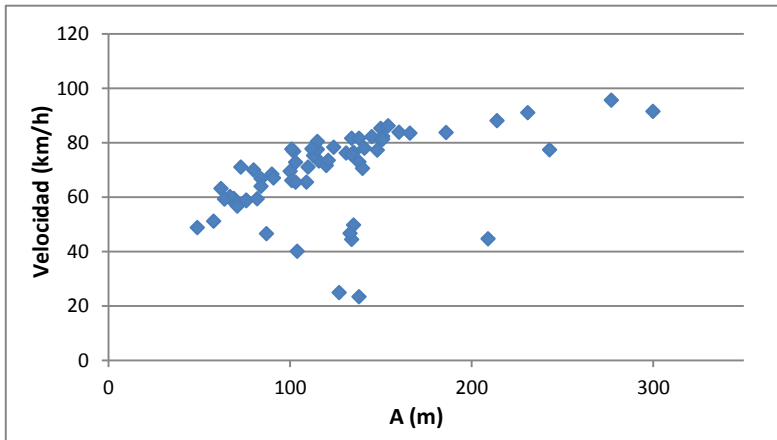


Figura 7.82 Parámetro de la clotoide anterior vs velocidad media en curva

La siguiente variable que mayor correlación positiva presenta con la velocidad media es el radio de la curva. La representación de esta relación se muestra en la figura 7.83.

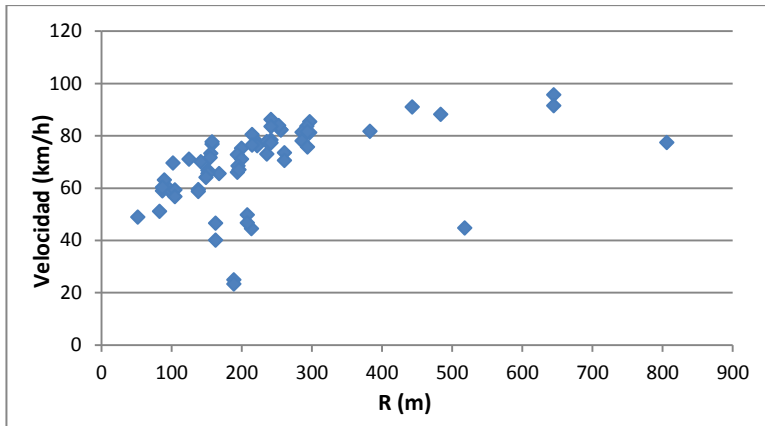


Figura 7.83 Radio de la curva vs velocidad media en curva

En cuanto a correlaciones negativas, la variable que presenta un valor mayor es la tasa de cambio de curvatura, calculada considerando tanto curva circular como clotoideas adyacentes. La representación de la relación entre esta variable y la velocidad media en la curva se muestra en la figura 7.84.

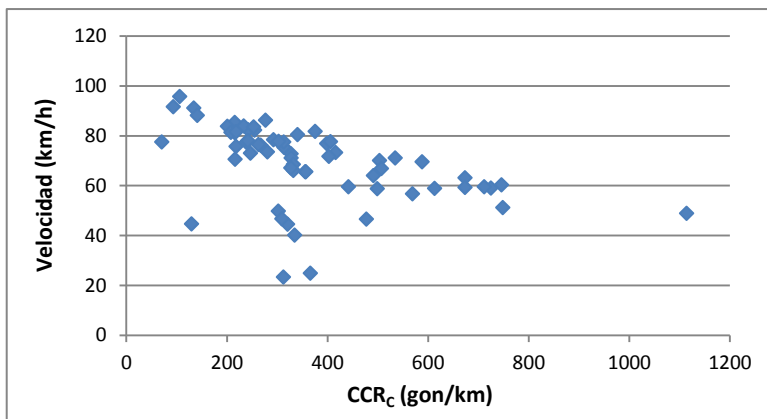


Figura 7.84 CCR de la curva vs velocidad media en la curva

Como se puede observar en estas tres gráficas, existen una serie de datos que presentan un comportamiento anómalo, con una velocidad media inferior a la que cabría esperar según la tendencia del resto de datos. El análisis de estos datos se realizará en el siguiente apartado.

Modelización de la media de la velocidad en secciones curva

Una vez estudiadas las relaciones entre las diferentes variables geométricas y la velocidad media en curvas, se prosigue con la calibración de modelos que hagan viable su estimación en tramos de carretera en los que no se tengan datos de velocidad. La calibración de estos modelos se centra en las tres variables que han resultado tener más correlación con la velocidad media.

Durante la calibración de los modelos se ha observado, como ya se ha citado en el apartado anterior, una serie de datos anómalos, que no deben ser tenidos en cuenta en el modelo. Las curvas cuyos datos más anomalías presentan son la C10I03 y C10V03, que son la misma curva pero con sentidos de circulación distintos. Las otras tres curvas que presentan datos anómalos, aunque en menor medida son: C08I03, C06V02 y la C05I03.

Se ha realizado un análisis detallado de la ubicación de las 5 curvas en busca de las causas que puedan dar como resultado una velocidad inferior a la esperada. Después del análisis únicamente se ha concluido que la curva C06V02 se encuentra en un tramo de carretera con zona urbanizada en los márgenes y que la curva C10I03/C10V03 tiene en ambos sentidos de circulación una señal de peligro de presencia de curva y una señal de límite de velocidad de 60 km/h, por lo que la velocidad en ellas puede tender a ser menor.

Teniendo en cuenta los resultados de este análisis, se descartarán las curvas C10I03, C10V03 y C06V02, manteniendo el resto.

Tras eliminar los datos citados, se han estudiado diferentes modelos utilizando el parámetro de la clotoide anterior, la tasa de cambio de curvatura de la curva y el radio de la misma como variables explicativas.

El modelo que mejor ajuste presenta tiene como variable explicativa el parámetro de la clotoide anterior. El modelo correspondiente, que se muestra en la ecuación 68, tiene un R^2 de 56.21 % y un R^2 ajustado de 55.47 %.

$$V_M = \sqrt{-1392.46 + 603.225 \cdot \sqrt{A}} \quad (68)$$

Su representación se muestra en la figura 7.85.

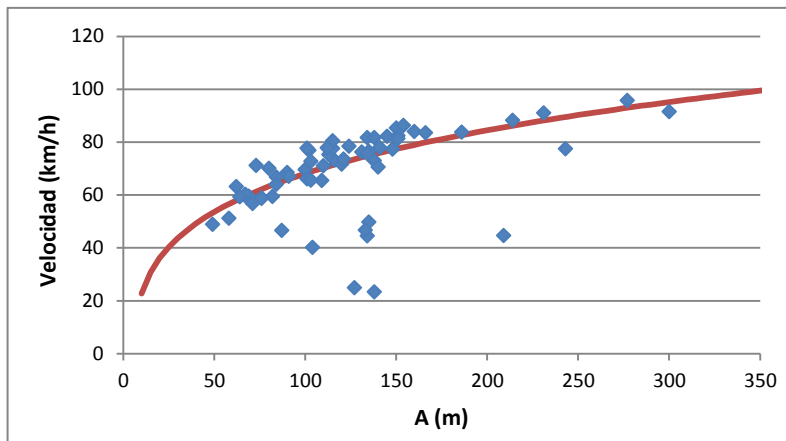


Figura 7.85 Modelo para la estimación de la velocidad media en una curva con el parámetro de la clotoide anterior como variable explicativa

El siguiente modelo que mejor correlación presenta, con un R^2 de 53.87 % y un R^2 ajustado de 53.09 %, tiene como variable explicativa el radio de la curva. La ecuación del modelo es la ecuación 69.

$$V_M = \sqrt{-7619.89 + 2420.63 \cdot \ln(R)} \quad (69)$$

Su representación se muestra en la figura 7.86.

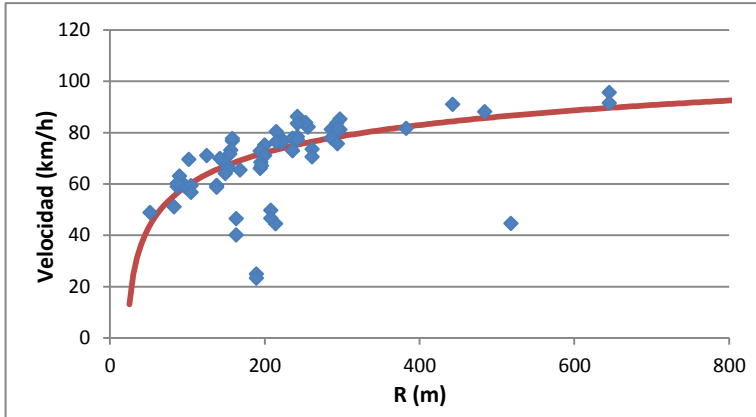


Figura 7.86 Modelo para la estimación de la velocidad media en una curva con el radio como variable explicativa

Finalmente, el modelo que menor variabilidad explica de la velocidad media es el que depende de la tasa de cambio de curvatura de la curva, que tan sólo tiene un 50.50 % de R^2 y un 49.66 % como R^2 ajustado (ecuación 70).

$$V_M = \sqrt{18699.5 - 2334.56 \cdot \ln(CCR_c)} \quad (70)$$

Su representación se muestra en la figura 7.87.

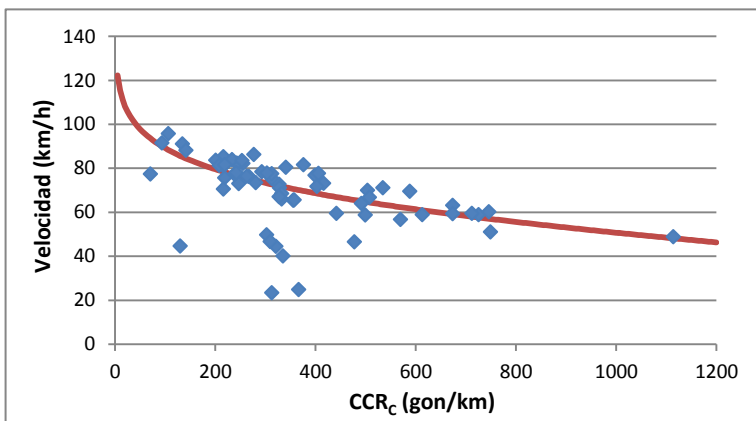


Figura 7.87 Modelo para la estimación de la velocidad media en una curva con la tasa de cambio de curvatura de la curva como variable explicativa

Los modelos presentados, como el resto que se presentarán en los siguientes apartados, únicamente son válidos en el rango al que pertenecen los datos a partir de los que se han calibrado.

7.3.1.5. Modelización de la desviación típica de la velocidad en secciones curva

Para definir completamente la distribución de velocidad, asumida normal, en las alineaciones curva, es necesario modelizar también la desviación típica de la distribución.

Los valores de desviación típica de la distribución de velocidad utilizados para esta calibración se han calculado, para cada una de las curvas mencionadas anteriormente, como el promedio de las desviaciones típicas calculadas en intervalos de 5 metros en la curva circular.

Influencia de las variables relacionadas con la geometría del trazado

Para el estudio de la influencia de cada una de las características geométricas del trazado, citadas al inicio de este apartado, en la desviación típica de la velocidad en las curvas estudiadas, se ha llevado a cabo un análisis de correlación.

En la tabla 7.21 se muestran los resultados del análisis de correlación para las variables en las que la correlación con la desviación típica es significativamente diferente de cero, con un nivel de confianza del 95 %.

	correlación	tamaño muestra	Valor-p
Radio curva	0.4146	64	0.0007
A clotoide 1	0.3858	64	0.0016
A clotoide 2	0.3409	64	0.0058
Longitud curva	0.3408	64	0.0059
Longitud curva circular	0.3305	64	0.0076
$CCR_{200\text{inicio}}$	-0.2358	64	0.0607
$CCR_{100\text{inicio}}$	-0.2562	64	0.041
CCR_C	-0.338	64	0.0063

Tabla 7.21 Resultados del análisis de correlación de la desviación típica de la velocidad en curvas

A diferencia de lo que ocurre en el caso de la velocidad media, la variable que más correlación presenta con la desviación típica de la velocidad en curvas es el radio de esta. En la figura 7.88 se muestra la relación entre las dos variables.

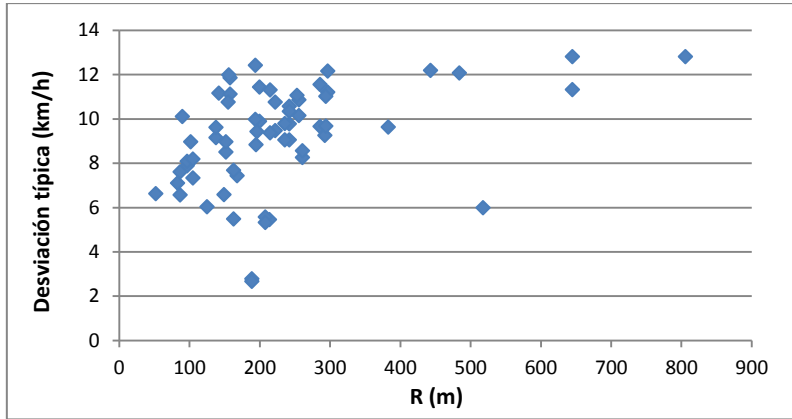


Figura 7.88 Radio de la curva vs desviación típica de la velocidad en curva

La variable que más correlación presenta después del radio es el parámetro de la clotoide anterior a la curva. Como en el caso de la media, a pesar de la diferencia con la correlación que presenta el parámetro de la clotoide posterior, se considera que esta situación es debido a que generalmente las clotoides son simétricas y únicamente se considera el parámetro de la clotoide anterior a la curva.

La relación entre el parámetro de la clotoide anterior y la desviación típica de la velocidad en curvas se presenta en la figura 7.89.

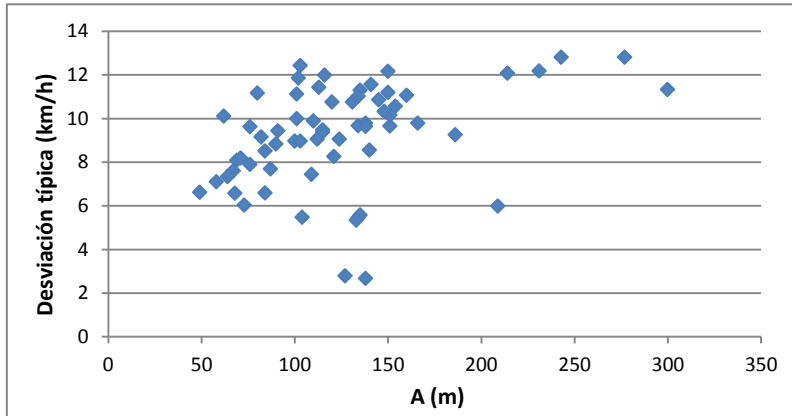


Figura 7.89 Parámetro de la clotoide anterior vs desviación típica de la velocidad en curva

El resto de variables presentan una correlación con la desviación típica bastante inferior y similar entre ellas, por lo que en el análisis únicamente se considerarán las dos variables descritas.

En las representaciones anteriores se observa cómo la tendencia de los datos en el caso de la desviación típica es menos clara que en el caso de la velocidad media. Sin embargo, la tendencia es la misma: tanto la velocidad media como la desviación

típica aumentan al aumentar el valor del radio y el valor del parámetro de la clotoide anterior.

Modelización de la desviación típica de la velocidad en secciones curva

Tras estudiar las relaciones entre las diferentes variables geométricas y la desviación típica de la velocidad en curvas, el siguiente paso consiste en la calibración de modelos que hagan viable su estimación en tramos de carretera en los que no se tengan datos de velocidad.

La calibración de estos modelos se centra en las dos variables que han resultado tener más correlación con la velocidad media: el radio de la curva y el parámetro de la clotoide anterior.

Durante la calibración de los modelos se ha observado, al igual que en el caso de la velocidad media, una serie de datos anómalos, que no deben ser tenidos en cuenta en el modelo. Las curvas cuyos datos han resultado ser anómalos son la C10I03, C10V03 y la C06V02. Estas curvas son las mismas que, por los mismos motivos, han tenido que ser eliminadas del análisis de la velocidad media.

Tras eliminar la desviación típica de la velocidad de las tres curvas citadas, se han estudiado diferentes modelos utilizando el parámetro de la clotoide anterior y el radio de la misma, como variables explicativas. Como se ha mencionado anteriormente, los datos no presentan una tendencia clara, lo que conlleva que los modelos resultantes no expliquen una alta variabilidad de la desviación típica de la velocidad.

El modelo que más R^2 presenta es el que tiene el radio de la curva como variable explicativa, con un 35.14 % y un 34.04 % de R^2 ajustado. Este modelo tiene como ecuación la número 71.

$$\sigma_v = \sqrt{14.8194 + 5.38444 \cdot \sqrt{R}} \quad (71)$$

Su representación se muestra en la figura 7.90.

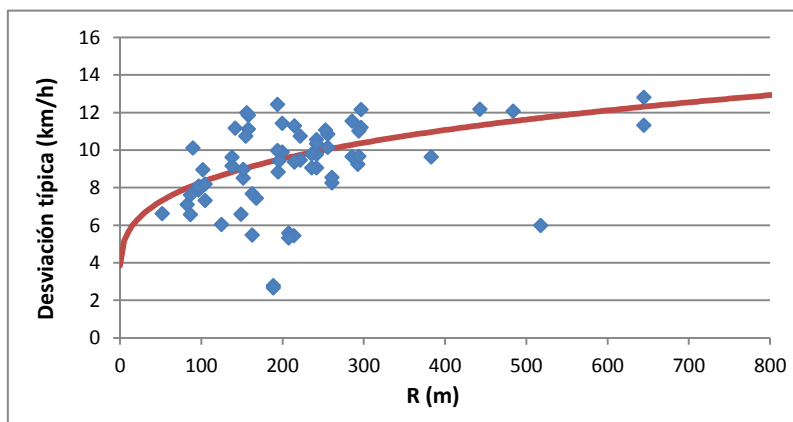


Figura 7.90 Modelo para la estimación de la desviación típica de la velocidad en una curva con el radio de la curva como variable explicativa

Por otra parte, el modelo que tiene como variable explicativa el parámetro de la clotoide anterior, presenta una R^2 de 33.58 % y R^2 ajustado de 32.46 %. Este modelo se define según la ecuación 72.

$$\sigma_v = \sqrt{-14.0398 + 9.84084 \cdot \sqrt{A}} \quad (72)$$

En la figura 7.91 se presenta la representación de este modelo.

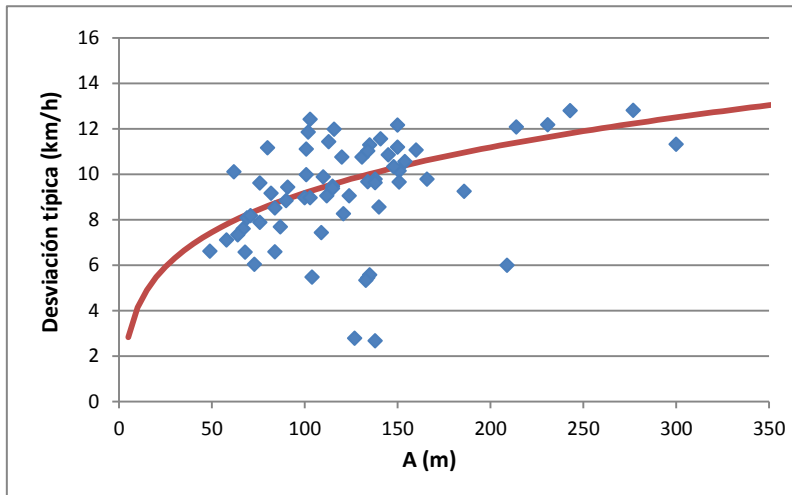


Figura 7.91 Modelo para la estimación de la desviación típica de la velocidad en una curva con el parámetro de la clotoide anterior como variable explicativa

Combinando los modelos presentados para la media y la desviación típica de la velocidad, es posible construir la distribución de la velocidad en una alineación curva en la que no se tienen datos de velocidad, a partir de las características geométricas del trazado.

7.3.1.6. Modelización de la V_{85} en secciones curva

Como se ha citado en el estado del arte, con el fin de conocer el comportamiento de los conductores, la variable que se suele caracterizar es la velocidad de operación, definida como el percentil 85 de la distribución de velocidades desarrolladas por los conductores en un tramo de carretera en condiciones de flujo libre.

En principio, el valor de este parámetro podría obtenerse a partir de la media y la desviación típica de la distribución, estimadas a partir de los modelos anteriormente obtenidos. Sin embargo, como se ha mostrado, el ajuste de estos modelos no es demasiado alto, por lo que la estimación del percentil 85 a partir de ellos presentaría un ajuste al real incluso menor.

Por tanto, en este apartado se muestra la modelización para este percentil de la velocidad de forma exclusiva que permita una mejor estimación del percentil 85 real de la velocidad en alineaciones curvas.

Comparación de las velocidades utilizadas en estudios de secciones curva

La mayor parte de los modelos de estimación de la velocidad de operación en secciones curva han sido calibrados a partir de datos puntuales de velocidad tomados en el punto medio de la curva, considerando que es en ese punto en el que se produce la velocidad mínima. Sin embargo, esta hipótesis no ha sido comprobada.

Por ello, 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 es estadísticamente aceptable 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:

- V85MIN: velocidad mínima en la curva obtenida del perfil de velocidad correspondiente al percentil 85.
- VMIN85: percentil 85 de las velocidades mínimas presentadas por cada uno de los conductores, a lo largo de la curva.
- V85CTRO: percentil 85 de la velocidad registrada en el centro de la curva.

La comparación entre ellas se ha realizado por parejas de variables para las alineaciones curvas de cuatro de los tramos en los que se han tomado datos. La elección de estos tramos se ha realizado de forma aleatoria, resultando elegidos los tramos 3, 7, 8 y 9.

Para la comprobación es necesario verificar en primer lugar si las varianzas de las dos poblaciones pueden considerarse iguales: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$. Para ello, el estadístico apropiado es la F de Snedecor, definido según la ecuación 73 en función de las varianzas de las dos muestras analizadas.

$$F = \frac{S_{C1}^2}{S_{C2}^2} \quad (73)$$

Una vez se ha probado que las varianzas de las dos poblaciones pueden considerarse iguales, se realiza la comparación por pares de las medias. Se realiza un análisis apareado porque los datos de las dos variables estudiadas en cada caso están correlacionados al tratarse cada par de un conductor determinado.

Por tanto, la hipótesis a comprobar es $H_0 \equiv \mu_1 = \mu_2$, siendo μ_1 y μ_2 , las medias de las dos muestras, que equivale a $H_0 \equiv \mu_d = 0$, siendo $\mu_d = \mu_1 - \mu_2$. El estadístico apropiado para este caso es la media de las diferencias muestrales ($D_i = X_i - Y_i$, su media se representa como \bar{D} y su varianza como S_{CD}^2).

Para un nivel de significación α es posible encontrar dos valores críticos, a y b, tales que el intervalo $a < \bar{D} < b$ defina la región de aceptación, mientras que $\bar{D} \leq a$ y $\bar{D} \geq b$ sean las semirrectas que definen la región crítica. El estadístico de contraste utilizado es el definido en la ecuación 74.

$$T = \frac{|\bar{D}|}{\frac{S_{CD}}{\sqrt{n}}} \quad (74)$$

La región crítica se plantea usualmente en términos de la t de Student con $n - 1$ grado de libertad. Si T cae en la región $|T| < t_{g;1-\alpha/2}$ (región de aceptación) se concluye aceptando la hipótesis nula H_0 ; en caso contrario, es $|T| \geq t_{g;1-\alpha/2}$ (región crítica) y se rechaza H_0 .

V85MIN vs VMIN85

Tras la comparación de los valores de ambas variables se han obtenido los resultados mostrados en la tabla 7.22.

The TTEST Procedure							
Variable: V85 (V85)							
V85_TIPO	N	Media	Dev std	Err std	Mínimo	Máximo	
V85MIN	28	81.2715	8.9071	1.6833	63.7436	94.6359	
VMIN85	28	80.3617	8.9752	1.6962	63.0297	94.0667	
Diff (1-2)		0.9098	8.9413	2.3897			
V85_TIPO	Método	Media	95% CL	Media	Dev std	95% CL	Dev std
V85MIN		81.2715	77.8177	84.7254	8.9071	7.0422	12.1238
VMIN85		80.3617	76.8815	83.8419	8.9752	7.0960	12.2165
Diff (1-2)	Combinada	0.9098	-3.8812	5.7008	8.9413	7.5273	11.0142
Diff (1-2)	Satterthwaite	0.9098	-3.8812	5.7008			
	Método	Varianzas	DF	Valor t	Pr > t		
	Combinada	Igual	54	0.38	0.7049		
	Satterthwaite	Unequal	53.997	0.38	0.7049		
Igualdad de varianzas							
	Método	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F		
	Folded F	27	27	1.02	0.9687		

Tabla 7.22 Resultados obtenidos tras la comparación de medias entre V85MIN y VMIN85

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que, con una F de 1.02 con una significación de $0.9687 > 0.05$, las varianzas se pueden suponer iguales. Por este motivo, mediante el contraste de medias con varianzas iguales, un t -valor de 0.38 con 54 grados de libertad y una significación de $0.7049 > 0.05$, las medias se pueden considerar iguales; o lo que es lo mismo, no hay diferencias significativas entre las velocidades calculadas como V85MIN y las calculadas como VMIN85.

Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, $(-3.8812, 5.7008)$, al pertenecer el 0 a este intervalo, las medias se pueden considerar iguales.

V85MIN vs V85CTRO

Tras la comparación de los valores de ambas variables se han obtenido los resultados presentados en la tabla 7.23.

The TTEST Procedure
Variable: V85 (V85)

V85_TIPO	N	Media	Dev std	Err std	Mínimo	Máximo
V85CTROCURV	28	82.2448	9.1569	1.7305	65.6423	94.6359
V85MIN	28	81.2715	8.9071	1.6833	63.7436	94.6359
Diff (1-2)		0.9733	9.0329	2.4141		

V85_TIPO	Método	Media	95% CL Media	Dev std	95% CL Dev std
V85CTROCURV		82.2448	78.6941 85.7955	9.1569	7.2396 12.4638
V85MIN		81.2715	77.8177 84.7254	8.9071	7.0422 12.1238
Diff (1-2)	Combinada	0.9733	-3.8668 5.8133	9.0329	7.6045 11.1271
Diff (1-2)	Satterthwaite	0.9733	-3.8669 5.8134		

Método	Varianzas	DF	Valor t	Pr > t
Combinada	Igual	54	0.40	0.6884
Satterthwaite	Unequal	53.959	0.40	0.6884

Igualdad de varianzas

Método	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
Folded F	27	27	1.06	0.8868

Tabla 7.23 Resultados obtenidos tras la comparación de medias entre V85MIN y V85CTRO

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que, con una F de 1.06 con una significación de $0.8868 > 0.05$, las varianzas se pueden suponer iguales. Por este motivo, mediante el contraste de medias con varianzas iguales, un t-valor de 0.40 con 54 grados de libertad y una significación de $0.6884 > 0.05$, las medias se pueden considerar iguales; o lo que es lo mismo, no hay diferencias significativas entre las velocidades calculadas como V85MIN y las calculadas como V85CTRO.

Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, (-3.8668, 5.8133), al pertenecer el 0 a este intervalo, las medias se pueden considerar iguales.

VMIN85 vs V85CTRO

Después de la comparación de los valores de ambas variables se han obtenido los resultados de la tabla 7.24.

The TTEST Procedure
Variable: V85 (V85)

V85_TIPO	N	Media	Dev std	Err std	Mínimo	Máximo
V85CTROCURV	28	82.2448	9.1569	1.7305	65.6423	94.6359
VMIN85	28	80.3617	8.9752	1.6962	63.0297	94.0667
Diff (1-2)		1.8831	9.0665	2.4231		

V85_TIPO	Método	Media	95% CL Media	Dev std	95% CL Dev std
V85CTROCURV		82.2448	78.6941 85.7955	9.1569	7.2396 12.4638
VMIN85		80.3617	76.8815 83.8419	8.9752	7.0960 12.2165
Diff (1-2)	Combinada	1.8831	-2.9750 6.7412	9.0665	7.6328 11.1685
Diff (1-2)	Satterthwaite	1.8831	-2.9750 6.7412		

Método	Varianzas	DF	Valor t	Pr > t
Combinada	Igual	54	0.78	0.4405
Satterthwaite	Unequal	53.978	0.78	0.4405

Igualdad de varianzas

Método	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
Folded F	27	27	1.04	0.9178

Tabla 7.24 Resultados obtenidos tras la comparación de medias entre VMIN85 y V85CTRO

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que, con una F de 1.04 con una significación de $0.9178 > 0.05$, las varianzas se pueden suponer iguales. Por este motivo, mediante el contraste de medias con varianzas iguales, un t -valor de 0.78 con 54 grados de libertad y una significación de $0.4405 > 0.05$, las medias se pueden considerar iguales; o lo que es lo mismo, no hay diferencias significativas entre las velocidades calculadas como V_{MIN85} y las calculadas como V_{85CTRO} .

Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, $(-2.9750, 6.7412)$, al pertenecer el 0 a este intervalo, las medias se pueden considerar iguales.

V85MIN vs VMIN85 vs V85CTRO

Después del estudio realizado, se puede concluir que estadísticamente los valores procedentes de los tres cálculos de la velocidad mínima en curvas son iguales. Las mismas conclusiones se desprenden del diagrama Box-and-Whisher que se presenta en la figura 7.92.

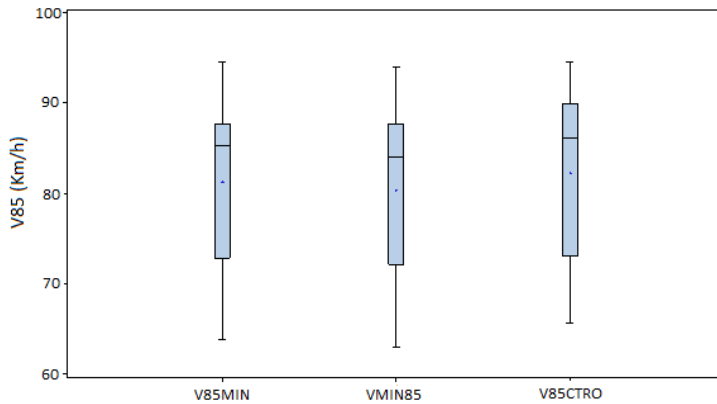


Figura 7.92 Diagrama Box-and-Whisher para la comparación V_{85MIN} vs V_{MIN85} vs V_{85CTRO}

Por tanto, considerando que las tres variables calculadas son estadísticamente iguales, en los siguientes apartados podría utilizarse cualquiera de ellas. En el caso de la modelización de la velocidad de operación en alineaciones curvas, se va a utilizar como variable la velocidad mínima en curva del perfil de velocidad correspondiente al percentil 85.

Al disponer de perfiles continuos de velocidad, en lugar de tomar la velocidad en un único punto, se va a tomar la velocidad promedio de la zona de la curva en la que la velocidad mínima permanece aproximadamente constante. Para ello, para cada una de las curvas, se identificará la zona en la que la velocidad en curva permanece aproximadamente constante en sus valores mínimos y se calculará el promedio de estas velocidades.

El proceso se lleva a cabo analizando curva a curva, y no tomando directamente la velocidad mínima en la curva, para evitar que por mecanizar excesivamente el

procedimiento se tomen puntos que no se correspondan con el fenómeno buscado, debido a la precisión de los datos.

En la figura 7.93 se muestra un ejemplo, perteneciente al tramo de toma de datos 9, en el que se aprecia claramente cómo, tomando el valor mínimo en la curva, se habría cometido un error.

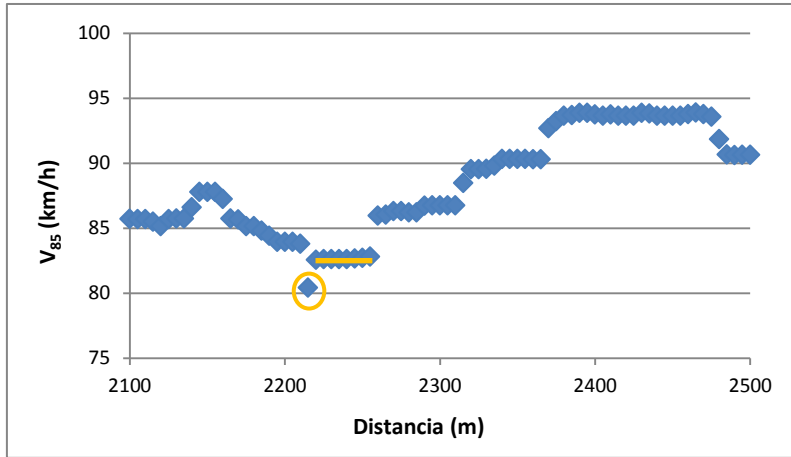


Figura 7.93 Obtención de la velocidad mínima en curvas a partir del perfil de velocidad de operación

Influencia de las variables relacionadas con la geometría del trazado

Antes de proceder al desarrollo de los modelos, es necesario realizar un estudio sobre las variables con el fin de conocer qué variables están relacionadas con la variable que se pretende modelizar, en este caso las características geométricas con la velocidad de operación en curvas.

Tras el estudio realizado, las variables que presentan una correlación con la velocidad de operación en curvas significativamente diferente de cero con un nivel de confianza del 95 % son las que aparecen en la tabla 7.25.

	correlación	tamaño muestra	Valor-p
A clotoide 1	0.7303	64	0.0000
A clotoide 2	0.7267	64	0.0000
Radio curva	0.6277	64	0.0000
Longitud clotoide 1	0.6207	64	0.0000
Longitud clotoide 2	0.5886	64	0.0000
Longitud curva	0.4888	64	0.0000
Longitud curva circular	0.2931	64	0.0188
CCR_{R-C}	-0.2670	64	0.0330
Ángulo de deflexión	-0.2737	64	0.0287

CCR	-0.2880	64	0.0210
CCR_{R-C-R}	-0.3329	64	0.0072
$CCR_{200inicio}$	-0.3766	64	0.0022
$CCR_{100inicio}$	-0.4533	64	0.0002
$CCR_{100CTRO}$	-0.5627	64	0.0000
CCR_C	-0.7384	64	0.0000

Tabla 7.25 Resultados del análisis de correlación de la V_{85} en curvas

Teniendo en cuenta estos resultados, se puede concluir que, en general, las variables geométricas presentan una mayor correlación con el percentil 85 de la velocidad de operación que con la velocidad media.

Al igual que en el caso de la velocidad media, la variable que más correlación positiva presenta con la V_{85} es el parámetro de la clotoide anterior. Obviamente, esto implica también una alta correlación con la clotoide posterior a la curva, ya que suelen ser prácticamente simétricas. Sin embargo, considerando la correlación en valores absolutos, la variable que mayor correlación presenta con la velocidad de operación es la tasa de cambio de curvatura de la curva, incluyendo el tramo de curva circular y las dos curvas de transición adyacentes, con una correlación negativa de 0.7384.

Por otra parte, V_{85} y el radio de la curva están correlados positivamente con un coeficiente de correlación de 0.6277 y con significación unilateral de $0.0000 < 0.05$. Una correlación muy similar presenta la longitud de la clotoide anterior a la curva. El resto de las variables presentan una correlación con la velocidad de operación considerablemente inferior.

Asimismo, se ha estudiado también la correlación entre la inversa de algunas de estas variables con la velocidad de operación, dando como resultado que en el caso de la inversa del radio la correlación aumenta a -0.7431. Este dato será tenido en cuenta a la hora de modelar, ya que un modelo dependiente de la inversa del radio podría explicar mayor variabilidad que un modelo basado en el radio.

Según estas consideraciones, en principio, durante la modelización se deberá trabajar con las variables: inversa del radio (curvatura), CCR de la curva, parámetro de la clotoide anterior, radio de la curva y longitud de la clotoide anterior, por este orden de prioridad.

A continuación, se muestran las gráficas que relacionan la V_{85} con estas cinco variables, con el fin de comprobar visualmente las afirmaciones anteriores.

En las figuras 7.94 y 7.95, se aprecia claramente cómo al aumentar la curvatura y la tasa de cambio de curvatura de la curva, la velocidad de operación decrece. Este decrecimiento es más acusado con curvaturas y CCR pequeños, mientras que para valores más altos, estas variables tienden a ser constantes.

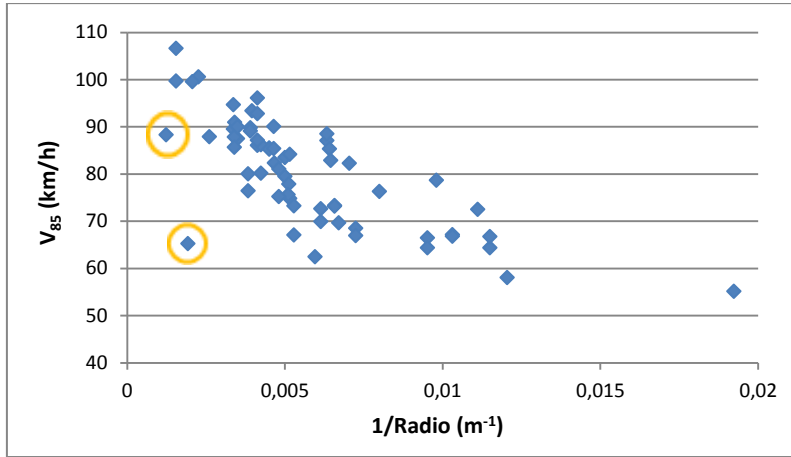


Figura 7.94 Inversa del radio de la curva vs V_{85} en curva

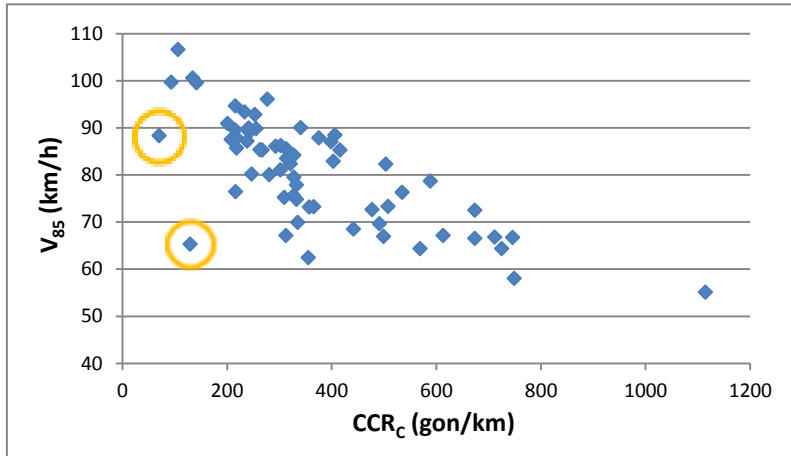


Figura 7.95 CCR de la curva vs V_{85} en curva

El efecto contrario se produce en las figuras 7.96 y 7.97. En ellas, se observa cómo aumenta la velocidad de operación en la curva al aumentar el parámetro de la clotoide anterior y el radio de la curva circular. En ambos casos, aunque especialmente en el caso del radio, en el entorno de valores bajos de la variable, un pequeño aumento de esta supone un considerable aumento de la velocidad de operación, mientras que para valores mayores, el incremento relativo de la velocidad es menor.

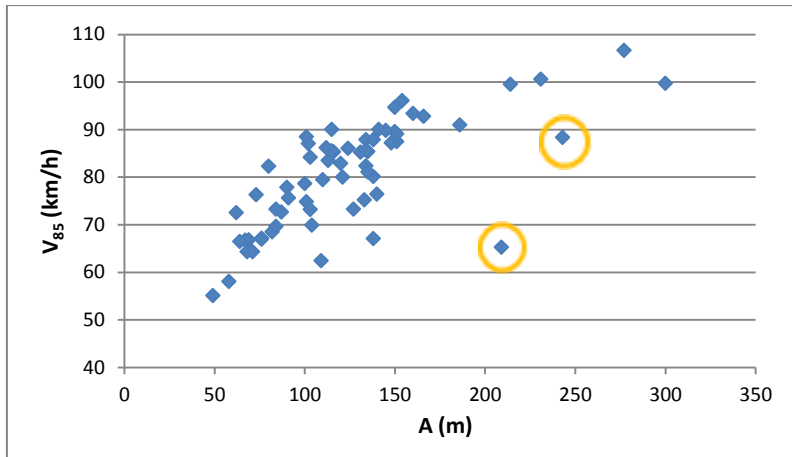


Figura 7.96 Parámetro de la clotoide anterior vs V_{85} en curva

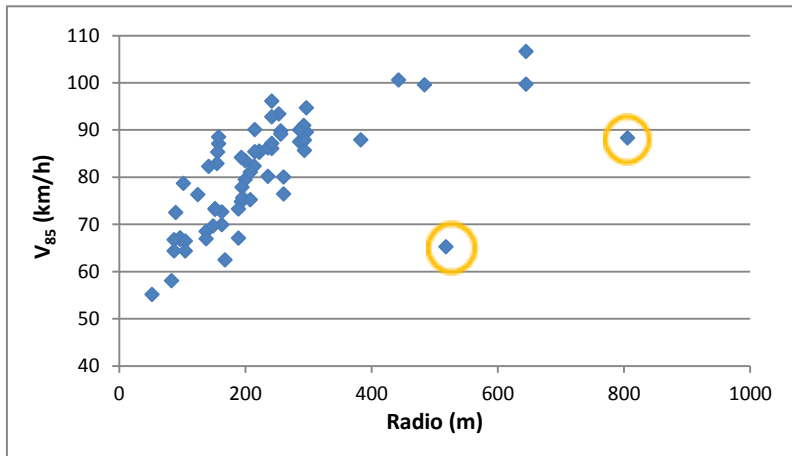


Figura 7.97 Radio de la curva vs V_{85} en curva

Las dos variables anteriores están relacionadas por la longitud de la clotoide. Esta variable también presenta una alta correlación con la V_{85} , aunque inferior al resto. Como se observa en la figura 7.98, la velocidad de operación tiende a aumentar con el aumento de la longitud de la clotoide, sin embargo la tendencia no es tan clara como en el resto de los casos analizados.

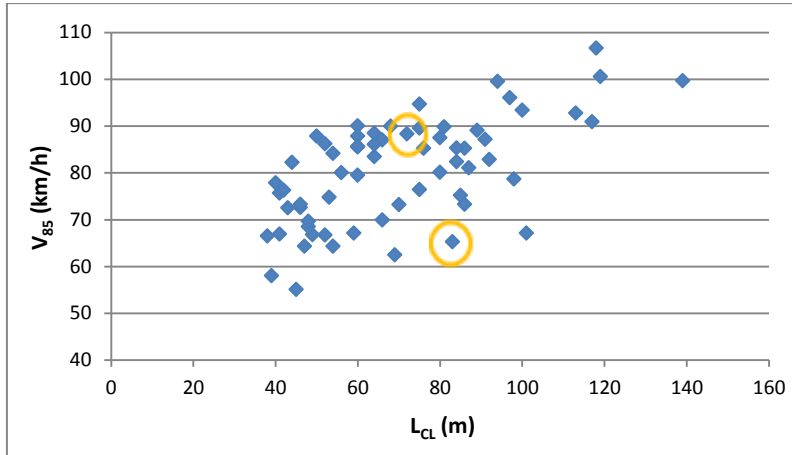


Figura 7.98 Longitud de la clotoide anterior vs V_{85} en curva

En las gráficas anteriores se aprecian ciertos datos que podrían considerarse anómalos o fuera del rango del resto de datos. Antes de pasar a la modelización se han estudiado las posibles causas y se han detectado dos curvas en las que podrían aparecer problemas o cambios de comportamiento de los conductores. Las curvas que presentan datos de V_{85} anómalos son la C06V02 y la C08V01. La primera de ellas, también se presentó como dato anómalo en el estudio de la velocidad media. Se han marcado estas dos curvas en los gráficos anteriores, apareciendo como claros datos anómalos en los gráficos de variables como el radio, mientras que en el caso de la longitud de la clotoide no serían considerados datos anómalos.

La curva C06V02 se encuentra en un entorno semiurbanizado, como muestra la figura 7.99, con lo que los conductores moderan la velocidad en ese tramo, presentando valores inferiores a los que se podría esperar en curvas de esas características.



Figura 7.99 Situación de las curvas C06V01 y C06V02

En cuanto a la curva C08V01, también presenta un valor de velocidad de operación inferior a lo que sería esperable. Esto es debido a que, como se ve en la figura 7.100, se encuentra próxima a una propiedad privada con una bahía habilitada para la entrada y salida de vehículos.



Figura 7.100 Situación de la curva C08V01

Modelización de la V_{85} en secciones curva

Una vez se han analizado las relaciones existentes entre las diferentes variables geométricas y el percentil 85 de velocidad de operación en las alineaciones curva, se procede al desarrollo y calibración de modelos que permitan su estimación.

En la fase inicial de modelización, al llevar a cabo el análisis de residuos, se han detectado dos datos anómalos, que se corresponden con las curvas descritas en el apartado anterior. Por tanto, los valores correspondientes de V_{85} se eliminan del análisis, quedando una muestra de 62 curvas.

En esta fase se han evaluado también las diferentes variables que podrían formar parte de los modelos para la estimación de la velocidad. Los resultados han mostrado que las que mejor se comportan son: el radio de la curva y su inversa, el parámetro de la clotoide anterior y la tasa de cambio de curvatura de la curva.

Con ellas, se han realizando diferentes combinaciones. Para su análisis, los modelos se han clasificado en tres grupos: modelos de regresión lineal con una única variable explicativa, modelos de regresión lineal múltiple con más de una variable explicativa y modelos no lineales.

Modelos de regresión lineal simple

Los modelos de regresión simple calibrados se muestran en la tabla 7.26, junto con el coeficiente de correlación y el coeficiente de correlación ajustado por el número de coeficientes correspondientes. Este último valor es usado frecuentemente para comparar modelos con diferente número de coeficientes.

Modelo	Expresión	R^2	R^2 ajustado
C1	$V_{85} = 63.8871 + 0.07702 \cdot R$	62.68%	62.06%

C2	$V_{85} = 97.3093 - 2876/R$	62.61%	61.99%
C3	$V_{85} = \sqrt{-9933.38 + 3144.03 \cdot \ln(R)}$	72.20%	71.74%
C4	$V_{85} = 57.5777 + 0.189317 \cdot A$	65.95%	65.39%
C5	$V_{85} = 105.745 - 2680.08/A$	69.36%	68.85%
C6	$V_{85} = \sqrt{-13189.2 + 4184.29 \cdot \ln(A)}$	73.33%	72.88%
C7	$V_{85} = 98.1501 - 0.04676 \cdot CCR_C$	62.21%	61.58%
C8	$V_{85} = 64.5949 + 4787.89/CCR_C$	58.80%	58.11%
C9	$V_{85} = \sqrt{24642.2 - 3098.97 \cdot \ln(CCR_C)}$	68.89%	68.37%

Tabla 7.26 Modelos de regresión lineal simple para la estimación de la V_{85} en curvas

Dentro de este grupo de modelos, se distinguen aquellos en los que no se ha realizado transformación alguna sobre ninguna de las variables y aquellos en los que sí. Estas transformaciones han consistido en:

- Inversa de la variable independiente.
- Logaritmo neperiano de la variable independiente.
- Cuadrado de la variable dependiente y logaritmo neperiano de la independiente.

Para la comparación entre los modelos sin ninguna transformación y los modelos con transformación en alguna variable no puede realizarse únicamente a partir de la R^2 . Esto es debido a que el estadístico R^2 es calculado después de transformar las variables, por lo que el modelo con el R^2 más alto puede no ser el mejor modelo. Por ello, es recomendable representar los modelos para comprobar el ajuste a los datos.

En la figura 7.101 se muestran los modelos puramente lineales, es decir, aquellos en los que las variables utilizadas no han sufrido ninguna transformación. En ellos, se observa claramente como la línea recta no se adapta adecuadamente a la tendencia curva de los datos, para ninguna de las tres variables estudiadas.

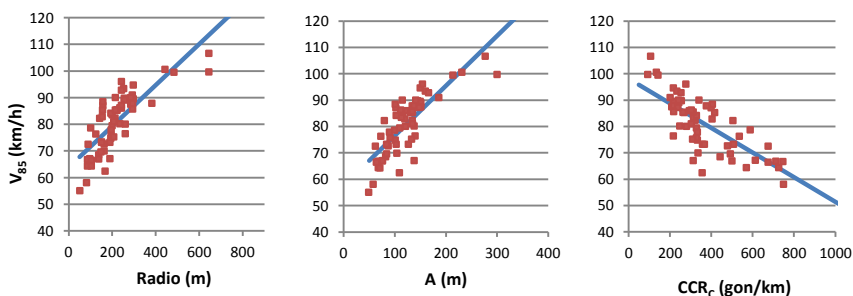


Figura 7.101 Modelos de regresión lineal para la estimación de la V_{85} en curvas: C1, C4 y C7

La primera transformación de variables realizada ha consistido en el cálculo de la inversa de la variable independiente. La representación de los modelos anteriores se muestra en la figura 7.102. La calibración de estos modelos supone un pequeño aumento de R^2 en el caso del modelo dependiente del parámetro de la clotoide

anterior respecto al obtenido para los modelos puramente lineales y una disminución cuando las variables independientes son el radio y la tasa de cambio de curvatura. Sin embargo, el comportamiento de los modelos se adapta mejor a la tendencia presentada por los datos.

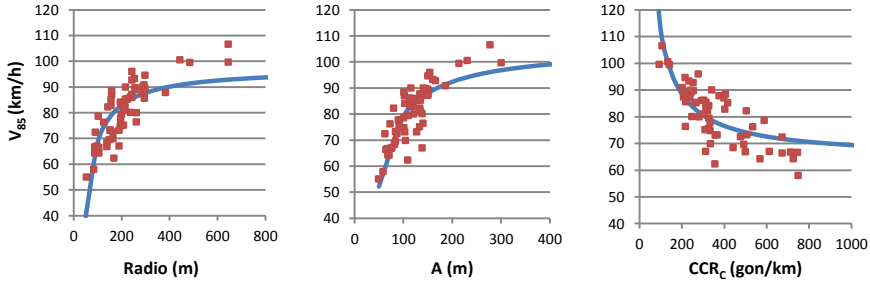


Figura 7.102 Modelos de regresión lineal para la estimación de la V_{85} en curvas: C2, C5 y C8

Si bien es cierto que los modelos se adaptan a los datos mejor que los anteriores, se observan claras deficiencias. Por una parte, tanto en el caso del modelo C2 como en el del modelo C5, para valores altos de la variable independiente, la velocidad de operación se subestima considerablemente, especialmente en el primer caso. En el último caso, la situación es la contraria: la velocidad se sobreestima.

La transformación que mejores resultados ha arrojado en los modelos lineales simples es la combinación del logaritmo de la variable independiente y el cuadrado de la variable dependiente. Así, resultan los modelos C3, C6 y C9, cuya representación se muestra en la figura 7.103.

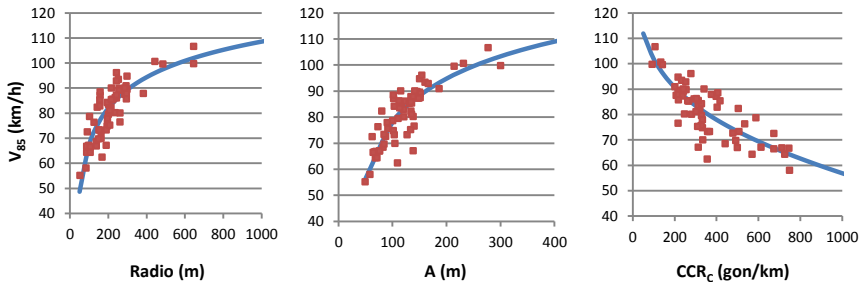


Figura 7.103 Modelos de regresión lineal para la estimación de la V_{85} en curvas: C3, C6 y C9

Estos modelos se comportan considerablemente mejor que los anteriores dentro del rango de los datos con los que se han calibrado. Fuera de este rango, al igual que el resto de modelos, su ajuste no está garantizado.

Modelos de regresión lineal múltiple

La modelización de la velocidad de operación en alineaciones curva ha intentado mejorarse mediante modelos de regresión múltiple, combinando en un modelo más

de una variable explicativa. Los modelos que mejores resultados han presentado se recogen en la tabla 7.27.

Modelo	Expresión	R ²	R ² ajustado
C10	$V_{85} = -35.9899 + 9.78743 \cdot \ln(R) + 13.7451 \cdot \ln(A)$	74.60%	73.74%
C11	$V_{85} = 58.8851 + 0.0225485 \cdot R + 0.13833 \cdot A$	66.54%	65.41%
C12	$V_{85} = 104.789 - 507.162/R - 2264.1/A$	69.64%	68.61%
C13	$V_{85} = 82.5967 - 1802.23/R + 2534.82/CCR_c$	70.37%	69.36%

Tabla 7.27 Modelos de regresión lineal múltiple para la estimación de la V_{85} en curvas

Entre ellos, el único que presenta una mejora significativa respecto a la mayoría de los modelos de regresión lineal simple es el modelo C10, con un 73.74 % de R² ajustado. La representación de este modelo, que explica un 74.60 % de variabilidad de la velocidad de operación, se muestra en la figura 7.104.

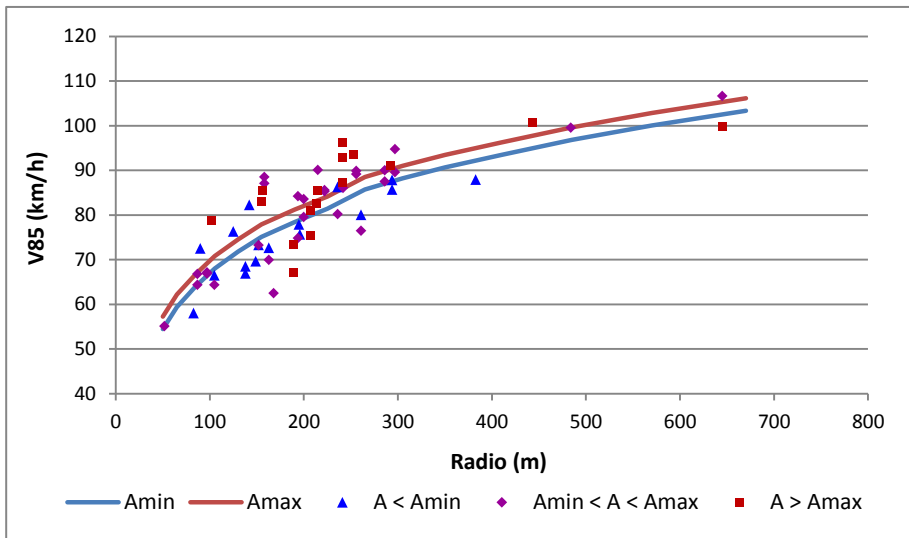


Figura 7.104 Modelo C10 de regresión lineal múltiple para la estimación de la V_{85} en curvas

En ella se observan los comportamientos de la velocidad de operación ya mostrados por los modelos de una sola variable: la velocidad de operación aumenta con el radio y con el parámetro de la clotoide. Para un mismo valor del radio, la velocidad en la curva será mayor cuando la longitud de la curva de transición sea mayor.

Modelo de regresión no lineal

Finalmente, se ha calibrado un modelo de regresión no lineal para la estimación de la velocidad de operación en curvas, según la estructura de la ecuación 75.

$$V_{85} = a - b/e^{c \cdot R} \tag{75}$$

Los coeficientes a, b y c se han estimado utilizando mínimos cuadrados no lineales, dando como resultado el modelo que aparece en la tabla 7.28.

Modelo	Expresión	R ²	R ² ajustado
C14	$V_{85} = 106.863 - 60.1185/e^{0.00422596 \cdot R}$	72.14%	71.20%

Tabla 7.28 Modelos de regresión no lineal para la estimación de la V_{85} en curvas

Con este modelo, que presenta un R² ajustado de 71.20 %, se presenta un comportamiento que se ajusta al de la velocidad de operación en curvas considerablemente mejor a como lo hacen los modelos anteriores también con el radio como única variable explicativa. Como muestra la figura 7.105, utilizando este modelo, a diferencia de lo que ocurre en otros, se obtienen velocidades de operación en curva positivas incluso para radios inferiores a 50 metros. Por otra parte, para radios amplios la velocidad tiende a poco más de 106 km/h, ajustándose adecuadamente a los datos disponibles.

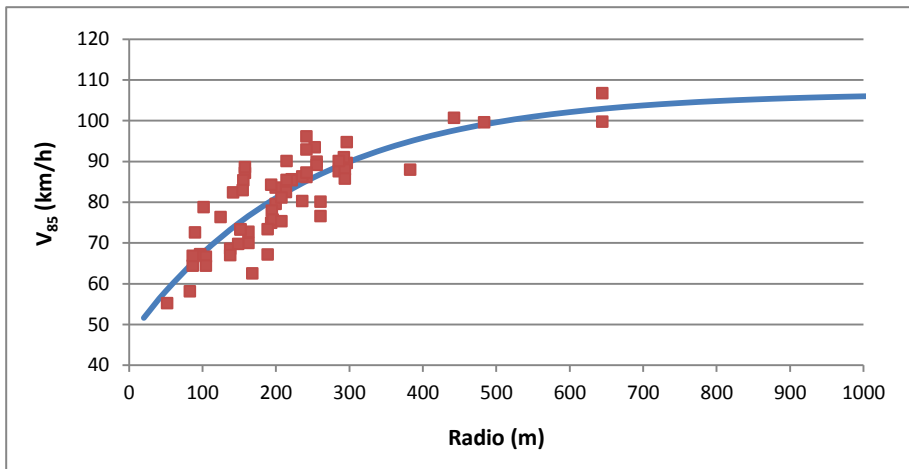


Figura 7.105 Modelo de regresión no lineal para la estimación de la V_{85} en curvas

7.3.1.7. Estudio de la velocidad elegida por los conductores en secciones curva

Al analizar la seguridad vial, se consideran como los principales factores concurrentes: el vehículo, la infraestructura y el conductor. Generalmente, la mayor parte de los estudios, como se ha reflejado en el apartado de estado del arte, se han centrado en la infraestructura, al ser este el principal ámbito de actuación de los ingenieros. Sin embargo, el estudio de los otros dos factores concurrentes puede resultar determinante a la hora de diseñar programas de seguridad vial, campañas de concienciación y programas de educación. Por ello, el presente apartado se ha centrado en el análisis de la influencia de estos factores en la velocidad elegida por los conductores.

Este estudio se ha basado en los datos procedentes de las encuestas realizadas a los conductores durante las diferentes campañas de toma de datos. De esta forma,

se aborda el estudio de las diferencias en el comportamiento en la conducción entre los distintos tipos de usuarios. Debido a la relación entre velocidad y siniestralidad, esta puede ser una buena aproximación a sus diferencias en cuanto a siniestralidad, o, más bien, de las actitudes del conductor frente al riesgo.

En lugar de realizar un estudio individual de cada una de las variables, se ha realizado un análisis multivariable, con el fin de no confundir los efectos producidos con cada una de las variables, por la posible relación existente entre ellas. Por ejemplo, la velocidad observada en un estudio para mujeres puede ser mayor que la observada para los hombres, pero esto puede reflejar la circunstancia accidental de que las mujeres observadas tiendan a ser más jóvenes que los hombres. Por lo que, las velocidades más altas pueden atribuirse más a la edad que al género del conductor.

De esta forma, los resultados obtenidos consisten en las relaciones existentes entre las variables independientes (las características del conductor, del vehículo y del viaje) y la velocidad como variable dependiente relacionada con el riesgo.

Para la inclusión de las diferentes variables en el modelo se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- El género del conductor se introducirá como la variable dicotómica CONDUCTOR que valdrá 1 si el conductor es un hombre y 0 si se trata de una mujer. La muestra en cada uno de los casos se muestra en la tabla 7.29.

	Conductor-curva
Hombre (1)	3704
Mujer (0)	1181

Tabla 7.29 Muestra conductor-curva de la variable CONDUCTOR

- Para el estudio de la influencia de la edad del conductor en la velocidad elegida, no se considerará la edad como una variable cuantitativa sino que se valorará la influencia en la velocidad de la pertenencia del conductor a un rango de edad. Así, se han realizado distintos grupos de edad:
 - de 18 a 20 años, por considerarse los conductores noveles
 - de 21 a 80 años se han realizado grupos de 5 años
 - el grupo final consiste en los conductores con una edad entre 81 y 90 años

Cada uno de estos grupos constituirá una variable, cuyo valor será 1 si el conductor pertenece al grupo y 0 si no. No todas las variables se incluirán en el modelo, sino que el primero de los grupos será considerado como referencia. Por tanto, en el caso en que el valor del resto de los grupos sea 0 significará que el conductor se encuentra en el rango de edad entre 18 y 20 años.

La muestra en cada uno de los casos se muestra en la tabla 7.30.

	Conductor-curva SI (1)	Conductor-curva NO (0)
18-20 años	148	4804
21-25 años	295	4657
26-30 años	563	4389
31-35 años	638	4314
36-40 años	585	4367
41-45 años	515	4437
46-50 años	487	4465
51-55 años	294	4658
56-60 años	346	4606
61-65 años	212	4740
66-70 años	221	4731
71-75 años	113	4839
76-80 años	47	4905
81-90 años	8	4944

Tabla 7.30 Muestra conductor-curva de las variables relacionadas con la edad del conductor

- La experiencia del conductor medida en kilómetros conducidos al año, se medirá según la pertenencia a una de las variables dicotómica: KM_POCOS, KM_MEDIO o KM_MUCHOS, definidas en el apartado de tratamiento de datos. La variable no incluida en el modelo y considerada como referencia es KM_MEDIO.

La muestra en cada uno de los casos se muestra en la tabla 7.31.

	Conductor-curva SI (1)	Conductor-curva NO (0)
KM_POCOS	362	4590
KM_MEDIO	2625	2327
KM_MUCHOS	1106	3846

Tabla 7.31 Muestra conductor-curva de las variables relacionadas con la experiencia del conductor

- La longitud del viaje se mide según la pertenencia a las variables dicotómica: VIAJE_CORTO, VIAJE_MEDIO, VIAJE_LARGO o VIAJE_RUTA, definidas en el apartado de tratamiento de datos. La variable no incluida en el modelo y considerada como referencia es VIAJE_MEDIO.

La muestra en cada uno de los casos se muestra en la tabla 7.32.

	Conductor-curva SI (1)	Conductor-curva NO (0)
VIAJE_CORTO	1862	3090
VIAJE_MEDIO	1261	3691
VIAJE_LARGO	189	4763

VIAJE_RUTA	241	4711
------------	-----	------

Tabla 7.32 Muestra conductor-curva de las variables relacionadas con la longitud del viaje

- La frecuencia del viaje se incluye en el modelo como la variable dicotómica HABITUAL. Su valor será 1 si el trayecto es habitual y 0 si no lo es.

La muestra en cada uno de los casos se muestra en la tabla 7.33.

	Conductor-curva
Habitual (1)	3484
No habitual (0)	1195

Tabla 7.33 Muestra conductor-curva de la variable HABITUAL

- El propósito del viaje se incluye en el modelo como la variable dicotómica LABORAL. Su valor será 1 si el trayecto es por motivos laborales y 0 si no lo es.

La muestra en cada uno de los casos se muestra en la tabla 7.34.

	Conductor-curva
Laboral (1)	2670
No laboral (0)	1818

Tabla 7.34 Muestra conductor-curva de la variable LABORAL

- La caracterización de los ocupantes en el modelo se realizará mediante tres variables cuantitativas: NIÑOS, ADULTOS, ANCIANOS. El valor de cada una de ellas es el número de niños, adultos o ancianos, respectivamente, que se encuentren como pasajeros en el vehículo.

La muestra en cada uno de los casos se muestra en la tabla 7.35.

	Conductor-curva
NIÑOS	162
ADULTOS	1355
ANCIANOS	174

Tabla 7.35 Muestra conductor-curva de las variables relacionadas con los ocupantes

- El tipo de vehículo se mide según la pertenencia a una de las variables dicotómicas: VH_LIGERO, VH_CAMIONETA, VH_FURGONETA, VH_MONOVOLUMEN o VH_TODOTERRENO, definidas en el apartado de tratamiento de datos. La variable no incluida en el modelo y considerada como referencia es VH_LIGERO.

La muestra en cada uno de los casos se muestra en la tabla 7.36.

	Conductor-curva SI (1)	Conductor-curva NO (0)
VH_LIGERO	2204	2748
VH_CAMIONETA	22	4930

VH_FURGONETA	618	4334
VH_MONOVOLUMEN	125	4827
VH_TODOTERRENO	198	4754

Tabla 7.36 Muestra conductor-curva de las variables relacionadas con la longitud del viaje

Los resultados del análisis en el que se han incluido todas las variables relacionadas anteriormente se muestran en la tabla 7.37. Este análisis se ha llevado a cabo con datos de 1316 conductores que, teniendo en cuenta que cada uno de ellos puede haber circulado por diferentes elementos, suponen un conjunto de 4952 vehículo-curva.

El modelo resultante explica un 9.81 % de la variabilidad de la velocidad elegida por los conductores en curvas.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	66.4587	1.1969	55.5258	0.0000
CONDUCTOR	2.52588	0.659407	3.83054	0.0001
EDAD_21_25	7.42338	1.40745	5.27435	0.0000
EDAD_26_30	0.684082	1.20124	0.569478	0.5690
EDAD_31_35	-1.16008	1.17963	-0.983422	0.3254
EDAD_36_40	-1.61975	1.20588	-1.34321	0.1792
EDAD_41_45	0.00166578	1.22493	0.0013599	0.9989
EDAD_46_50	-0.357736	1.24471	-0.287405	0.7738
EDAD_51_55	-0.70699	1.43722	-0.491915	0.6228
EDAD_56_60	-4.27885	1.34455	-3.18236	0.0015
EDAD_61_65	-3.20943	1.54421	-2.07836	0.0377
EDAD_66_70	-6.59606	1.60302	-4.11477	0.0000
EDAD_71_75	-9.25676	1.91262	-4.83982	0.0000
EDAD_76_80	-8.95321	3.1615	-2.83195	0.0046
EDAD_81_90	-3.55779	6.20468	-0.573405	0.5664
KM_POCOS	-0.241563	1.06754	-0.226279	0.8210
KM_MUCHOS	6.18528	0.6661	9.28581	0.0000
VIAJE_CORTO	-4.9	0.573485	-8.54426	0.0000
VIAJE_LARGO	-4.63597	1.36055	-3.40743	0.0007
VIAJE_RUTA	1.68683	1.24933	1.35019	0.1770
HABITUAL	4.96156	0.631762	7.85352	0.0000
LABORAL	-0.903201	0.627605	-1.43912	0.1501
NIÑOS	-4.40079	1.03496	-4.25214	0.0000
ADULTOS	-0.762638	0.473255	-1.61148	0.1071
ANCIANOS	-5.11112	1.12906	-4.52688	0.0000
VH_CAMIONETA	-7.88327	3.73107	-2.11287	0.0346
VH_FURGONETA	-3.29971	0.812338	-4.06199	0.0000
VH_MONOVOL	2.43016	1.67299	1.45259	0.1463
VH_TODOTERR	-3.5334	1.32592	-2.66486	0.0077

Tabla 7.37 Resultados del análisis del estudio de la velocidad elegida en curvas

A continuación, se detallan los resultados según las diferentes categorías.

Género del conductor

El género del conductor tiene un efecto significativo en la velocidad elegida, siendo 2.52 km/h mayor en los hombres que en las mujeres.

Edad del conductor

La edad de los conductores no ha resultado significativa en el rango comprendido entre 26 y 55 años y entre 81 y 90 años. Por tanto, puede concluirse que la velocidad elegida cuando el conductor se encuentra dentro de uno de estos grupos de edad es similar a la velocidad elegida por los conductores noveles. Sin embargo, la muestra en el rango de edad comprendido entre 81 y 90 años es inferior a 10 conductor-curva, por lo que no se pueden extraer conclusiones significativas para este grupo de conductores.

La velocidad aumenta casi 7.5 km/h en el rango de edad entre 21 y 25 años respecto a la velocidad elegida por los conductores noveles, para volver a disminuir al nivel de estos entre los 26 y 55 años. A partir de los 56 años, los conductores tienden a disminuir considerablemente su velocidad elegida en curvas.

Experiencia del conductor

La variable que caracteriza los conductores que conducen pocos kilómetros al año no ha resultado significativa, por lo que su velocidad elegida no será diferente a la elegida por los conductores que recorren un número medio de kilómetros. Sin embargo, los conductores que conducen muchos kilómetros al año eligen una velocidad en curvas alrededor de 6 km/h mayor al resto.

Longitud del viaje

Según los resultados del análisis, los conductores que conducen dentro de una ruta eligen una velocidad similar a los que están realizando un recorrido de longitud media. La velocidad elegida disminuye casi 5 km/h cuando la longitud del viaje es corta o larga.

Frecuencia del viaje

Cuando un trayecto es recorrido habitualmente la velocidad elegida por el conductor es 5 km/h superior a cuando no lo es.

Motivo del viaje

El motivo del viaje, distinguiendo si es por motivos laborales o no, no resulta significativo a la hora de elegir la velocidad a desarrollar en curvas.

Ocupantes

En el análisis de la influencia de la presencia de pasajeros en la velocidad elegida por el conductor, se puede concluir que la presencia de pasajeros adultos no supone ninguna influencia, mientras que cuando hay ancianos o niños, la velocidad disminuye considerablemente, tomando como referencia la situación en que el único ocupante del vehículo es el conductor.

Tipo de vehículo

Finalmente, se ha evaluado también la influencia del tipo de vehículo con el que se circula. Los resultados han mostrado una velocidad para los vehículos ligeros y monovolúmenes similar y una velocidad en torno a 3.5 km/h inferior para todoterrenos y furgonetas. En el caso de camionetas esta reducción aumenta a casi 8 km/h.

7.3.1.8. Estudio de la velocidad desarrollada por los conductores en secciones curva

El bajo R^2 del modelo indica que se han omitido variables explicativas clave, siendo posiblemente las más importantes las relacionadas con la geometría del trazado de la carretera. Incluyendo estas variables en el modelo se caracteriza la velocidad desarrollada por los conductores en las alineaciones curva.

Tras analizar la influencia de las distintas variables geométricas, las que aportan mejores resultados y, por tanto, se incorporan al modelo son el radio de la curva y la longitud de la curva circular. El resultado de esta incorporación es el modelo que se presenta en la tabla 7.38, con un R^2 de 30.26 %.

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico T	
CONSTANTE	51.7476	1.1422	45.3053	0.0000
CONDUCTOR	2.49225	0.580034	4.29674	0.0000
EDAD_21_25	7.1807	1.23993	5.79121	0.0000
EDAD_26_30	0.874368	1.05867	0.825909	0.4089
EDAD_31_35	-0.868766	1.04104	-0.83452	0.4040
EDAD_36_40	-1.73995	1.06244	-1.6377	0.1015
EDAD_41_45	-0.293076	1.07838	-0.271775	0.7858
EDAD_46_50	-0.271691	1.0962	-0.247848	0.8042
EDAD_51_55	-0.583381	1.26598	-0.460814	0.6449
EDAD_56_60	-2.81358	1.18409	-2.37616	0.0175
EDAD_61_65	-3.50608	1.35981	-2.57837	0.0099
EDAD_66_70	-5.71104	1.41103	-4.04742	0.0001
EDAD_71_75	-7.21693	1.68521	-4.2825	0.0000
EDAD_76_80	-9.96173	2.78143	-3.58151	0.0003
EDAD_81_90	-4.59141	5.46551	-0.840071	0.4009
KM_POCOS	-1.47804	0.940378	-1.57175	0.1160
KM_MUCHOS	0.61385	0.61708	0.994765	0.3198
VIAJE_CORTO	-2.52704	0.510243	-4.95262	0.0000
VIAJE_LARGO	-1.54796	1.2066	-1.28291	0.1995
VIAJE_RUTA	1.76902	1.09897	1.6097	0.1075
HABITUAL	4.73187	0.555711	8.51499	0.0000
LABORAL	-0.79439	0.552067	-1.43894	0.1502
NINOS	-3.07347	0.911888	-3.37045	0.0008
ADULTOS	-0.69209	0.416261	-1.66263	0.0964
ANCIANOS	-3.74082	0.99409	-3.76306	0.0002
VH_CAMIONETA	-3.04535	3.28655	-0.92661	0.3541
VH_FURGONETA	-3.26248	0.715881	-4.5573	0.0000
VH_MONOVOL	2.16258	1.47154	1.46961	0.1417
VH_TODOTERR	-2.8516	1.16648	-2.44462	0.0145
RADIO	0.0423525	0.00161452	26.2323	0.0000
LONG. CURVA CIRCULAR	0.122896	0.00564872	21.7564	0.0000

Tabla 7.38 Resultados del análisis inicial del estudio de la velocidad desarrollada en curvas

Los resultados muestran que, al considerar variables geométricas como el radio y la longitud de la curva circular, los kilómetros recorridos al año por los conductores no resultan significativos. Lo mismo ocurre cuando el viaje es largo o el conductor se encuentra en ruta, y cuando el conductor conduce una camioneta, es decir, un camión con MMA inferior a 3500 kg. El resto de las variables presentan un comportamiento similar al observado para la velocidad elegida.

Con este modelo, se han considerado gran cantidad de factores que pueden tener influencia en la velocidad desarrollada por los conductores en las alineaciones curva. Sin embargo, hay factores aleatorios que no han sido tomados en cuenta. Las curvas elegidas para el análisis se encuentran ubicadas en 9 tramos de carretera distintos, con características diferentes. Estas características pueden influir considerablemente en los resultados obtenidos. Así, puede producirse que, en los resultados anteriores, se haya concluido que los conductores con edades comprendidas entre 81 y 90 años conducen a una velocidad estadísticamente igual a la de los conductores noveles, debido al tramo por el que circulaban y no por causa de la edad.

Por ello, se ha introducido en el modelo una serie de variables que se corresponden con cada uno de los tramos de toma de datos. Se trata de una variable dicotómica para cada uno de los tramos, de forma que su valor será 1 si el conductor se encuentra circulando por ese tramo y 0 si no es así. El tramo considerado como referencia y que no se incluye en el modelo es el tramo 1 (del tramo 2 no se ha tomado ninguna curva por eso no aparece en el modelo). El modelo resultante tiene un R^2 de 51.56 %, un valor considerablemente alto si se tiene en cuenta que se trata de datos desagregados y que en el factor humano influyen una gran cantidad de variables difícilmente medibles, como por ejemplo la motivación.

La tabla 7.39 muestra los resultados finales del estudio de la velocidad desarrollada en curvas.

Parámetro	Estimación	Error	Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	64.3831	1.35511	47.5114	0.0000
CONDUCTOR	2.29672	0.487216	4.71397	0.0000
EDAD_21_25	2.31711	1.08268	2.14015	0.0323
EDAD_26_30	-3.50959	0.931034	-3.76957	0.0002
EDAD_31_35	-4.59376	0.913203	-5.03039	0.0000
EDAD_36_40	-5.64871	0.93672	-6.0303	0.0000
EDAD_41_45	-5.16502	0.956119	-5.40207	0.0000
EDAD_46_50	-5.53175	0.960111	-5.76157	0.0000
EDAD_51_55	-5.48041	1.10832	-4.94478	0.0000
EDAD_56_60	-7.14459	1.02296	-6.9842	0.0000
EDAD_61_65	-8.76899	1.17125	-7.48685	0.0000
EDAD_66_70	-7.09472	1.21891	-5.82053	0.0000
EDAD_71_75	-11.3046	1.44923	-7.80038	0.0000
EDAD_76_80	-13.8931	2.36715	-5.86915	0.0000
EDAD_81_90	-13.1296	4.61003	-2.84806	0.0044
KM_POCOS	-1.89482	0.792172	-2.39193	0.0168
KM_MUCHOS	-0.061395	0.604496	-0.101564	0.9191

VIAJE_CORTO	-0.219813	0.44179	-0.497551	0.6188
VIAJE_LARGO	-1.69061	1.05791	-1.59807	0.1100
VIAJE_RUTA	0.264965	0.92317	0.287017	0.7741
HABITUAL	3.53092	0.466968	7.56139	0.0000
LABORAL	-0.659923	0.463933	-1.42245	0.1549
NIÑOS	-0.788384	0.777221	-1.01436	0.3104
ADULTOS	-1.43408	0.351307	-4.08213	0.0000
ANCIANOS	-1.72785	0.834749	-2.0699	0.0385
VH_CAMIONETA	-2.31656	2.77212	-0.835664	0.4033
VH_FURGONETA	-2.08844	0.611303	-3.41637	0.0006
VH_MONOVOL	2.83158	1.22946	2.30311	0.0213
VH_TODOTERR	1.26195	0.983333	1.28334	0.1994
RADIO	0.0304627	0.00169786	17.9418	0.0000
LONG. CURVA CIRCULAR	0.0475077	0.00621487	7.6442	0.0000
TRAMO_3	10.786	1.17765	9.15896	0.0000
TRAMO_4	8.02264	1.00489	7.98361	0.0000
TRAMO_5	-4.82125	0.9325	-5.17025	0.0000
TRAMO_6	-21.2424	1.21432	-17.4933	0.0000
TRAMO_7	5.60744	0.960948	5.83532	0.0000
TRAMO_8	-11.9218	0.988426	-12.0614	0.0000
TRAMO_9	3.17572	1.27241	2.49584	0.0126
TRAMO_10	-18.9618	1.09081	-17.3833	0.0000

Tabla 7.39 Resultados del análisis del estudio de la velocidad desarrollada en curvas

A continuación, se detallan los resultados obtenidos tras estas consideraciones, según las diferentes categorías.

Género del conductor

El género del conductor sigue teniendo un efecto significativo en la velocidad elegida, siendo 2.29 km/h mayor en los hombres que en las mujeres. Este valor es ligeramente inferior al obtenido en el estudio inicial de la velocidad elegida.

Edad del conductor

La edad de los conductores ha resultado significativa para todos los rangos considerados, a diferencia de los casos anteriores.

La tendencia que se observa es un aumento de la velocidad entre los 21 y 25 años, respecto a la velocidad desarrollada por los conductores noveles. A partir de los 25 años, los conductores tienden a reducir la velocidad progresivamente con el aumento de la edad, permaneciendo aproximadamente constante, alrededor de 5 km/h menos que los conductores entre 18 y 20 años, entre los 36 y 55 años. A partir de los 55 años la tendencia a disminuir la velocidad es considerablemente mayor.

Experiencia del conductor

La variable que caracteriza los conductores que conducen muchos kilómetros no ha resultado significativa, por lo que la velocidad desarrollada por estos no será diferente a la elegida por los conductores que conducen un número medio de kilómetros al año. Sin embargo, los conductores que conducen pocos kilómetros desarrollan una velocidad ligeramente inferior al resto.

Longitud del viaje

Según los resultados del análisis, la longitud del viaje no es una variable significativa. Por tanto, la velocidad desarrollada en curvas no dependerá de ella.

Frecuencia del viaje

Cuando un trayecto es recorrido habitualmente la velocidad elegida por el conductor es 3.5 km/h superior a cuando no lo es.

Motivo del viaje

El motivo del viaje, distinguiendo si es por motivos laborales o no, no resulta significativo a la hora de elegir la velocidad a desarrollar en curvas.

Ocupantes

En el análisis de la influencia de la presencia de pasajeros en la velocidad desarrollada por el conductor, se muestra que la presencia de niños como pasajeros no supone ninguna influencia, mientras que cuando hay adultos o ancianos sí se produce un descenso de velocidad, aunque esta disminución es inferior a 2 km/h.

Tipo de vehículo

Finalmente, se ha evaluado también la influencia del tipo de vehículo con el que se circula. Los resultados han mostrado una velocidad para las camionetas y los todoterrenos similar a la de los vehículos ligeros y una velocidad entorno a 2 km/h inferior para furgonetas.

En el caso de los monovolúmenes, se muestra una velocidad 2.83 km/h superior a la de los vehículos ligeros. Es posible que este incremento se deba a unas altas prestaciones de los monovolúmenes que forman parte de la muestra estudiada.

7.3.2. Análisis de la velocidad en secciones recta

Como se ha visto a lo largo del estado del arte, los modelos para la estimación de la velocidad en rectas presentan mucha menor correlación que los modelos para curvas, debido a la falta de variables geométricas concretas que considerar.

La falta de variables no sólo provoca modelos mucho más heterogéneos que para secciones curva, sino que además el número de los mismos es mucho menor y la variabilidad finalmente explicada es mucho más reducida que en el otro caso.

La mayor parte de los modelos de estimación de la velocidad en tramos rectos han sido calibrados a partir de datos puntuales de velocidad tomados en el punto medio de la recta, considerando que es en ese punto en el que se alcanza una velocidad constante en la recta, fuera del tramo de aceleración y deceleración.

En este estudio, al disponer de datos continuos de velocidad individuales para cada uno de los conductores, se ha comprobado que no todos los vehículos alcanzan la velocidad constante en el centro de la recta.

Por ello, la velocidad utilizada como velocidad en rectas será aquella que se mantiene constante, sin influencia de aceleración o deceleración alguna, independientemente de si se sitúa en el centro de la recta o no.

7.3.2.1. Secciones recta a estudiar

Para la realización del estudio de la velocidad desarrollada en tramos rectos, es necesario utilizar aquellas rectas en las que se llega a alcanzar una velocidad más o menos constante, 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, por lo que no se alcanza una velocidad constante debido a la influencia de las curvas adyacentes. Sin embargo, 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.

Por ello, 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. Las 78 alineaciones a estudiar se muestran en la tabla 7.40.

Recta	Pk inicio	Pkfinal	Longitud (m)	Radio (m) curva anterior	Radio (m) curva posterior	Pendiente
R01I01	1314	2862	1548	2131	102	0.026
R01I02	3324	3563	239	136	392	0.036
R01I03	4926	5179	253	275	158	0.037
R01I04	5354	5558	204	158	90	0.054
R01I05	6067	6326	259	76	52	0.074
R01I06	10192	12735	2543	156		-0.005
R01V01	2862	1314	1548	102	2131	-0.026
R01V02	5558	5354	204	90	158	-0.054
R01V03	12735	10192	2543		156	0.005
R02I01	217	850	633	218	328	-0.015
R02I02	1397	1727	330	67	95	0.043
R02V01	1727	1397	330	95	67	-0.043
R03I01	166	1659	1493	3330	2041	0.013
R03I02	2332	2658	326	1954	297	0.010
R03I03	2837	3272	435	297	256	0.015
R03I04	3515	3542	27	256	1909	0.010

R03V01	1659	166	1493	2041	3330	-0.013
R03V02	2658	2332	326	297	1954	-0.010
R03V03	3272	2837	435	256	297	-0.015
R03V04	4259	3853	406	232	2451	-0.010
R04I01	664	988	324	1666	464	0.032
R04I02	2050	2480	430	242	645	-0.014
R04I03	2773	3186	413	645	443	-0.017
R04I04	4499	5035	536	353	694	-0.037
R04V01	988	664	324	464	1666	-0.032
R04V02	1767	1656	111	242	293	0.019
R04V03	2480	2050	430	645	242	0.014
R04V04	3186	2773	413	443	645	0.017
R04V05	5035	4499	536	694	353	0.037
R05I01	361	628	267	244	97	0.010
R05I02	749	1104	355	97	1851	0.000
R05I03	1350	1535	185	87	215	0.011
R05I04	1910	2699	789	734	628	0.008
R05I05	3085	3432	347	200	194	-0.014
R05I06	3554	3674	120	194	13451	-0.030
R05V01	628	361	267	97	244	-0.010
R05V02	1104	749	355	1850	97	-0.000
R05V03	2699	1910	789	628	734	-0.008
R05V04	3432	3085	347	194	200	0.014
R05V05	3674	3554	120	13451	194	0.030
R06I01	3184	4028	844	519		0.026
R06V01	3005	2700	305	519	327	-0.004
R06V02	4028	3184	844		519	-0.026

R07I01	1813	2827	1014	236	383	0.021
R07I02	3380	4810	1430	524	409	0.013
R07I03	5139	5387	248	222	216	-0.014
R07I04	6135	6497	362	842	349	-0.015
R07I05	6788	7015	227	286	294	-0.018
R07I06	7165	7955	790	294		-0.024
R07V01	1099	460	639	576	852	0.004
R07V02	2827	1813	1014	383	236	-0.021
R07V03	4810	3380	1430	409	524	-0.013
R07V04	6497	6135	362	348	842	0.015
R07V05	7015	6788	227	294	286	0.018
R07V06	7955	7165	790		294	0.024
R08I01	254	684	430	83	8005	-0.000
R08I02	2429	2577	148	146	105	0.000
R08I03	2673	3628	955	105	806	0.000
R08V01	684	254	430	8005	83	0.000
R08V02	2577	2429	148	105	146	-0.000
R08V03	3628	2673	955	806	105	-0.000
R08V04	4048	3782	266	539	806	-0.000
R08V05	5068	4935	133	138	305	-0.004
R08V06	5412	5170	242	4053	138	-0.002
R09I01	796	1683	887	484	372	-0.000
R09I02	2279	2422	143	204	822	-0.002
R09I03	5718	5744	26	254	1187	-0.025
R09I04	6088	6345	257	152		-0.038
R09V01	577	182	395	484	533	0.003
R09V02	1683	796	887	372	484	0.000

R10I01	0	530	530		261	-0.025
R10I02	669	1102	433	261	208	-0.017
R10I03	1276	2341	1065	208	189	-0.007
R10I04	2530	3046	516	189	149	-0.027
R10V01	530	0	530	261		0.025
R10V02	1102	669	433	208	261	0.017
R10V03	2341	1276	1065	181	208	0.007
R10V04	3046	2530	516	149	189	0.027

Tabla 7.40 Características geométricas de las rectas utilizadas en el estudio

El rango de pendientes en el que se encuentran estos tramos varía entre +7 % y -5 %, abarcando así un ámbito mayor que en la mayoría de las investigaciones en las que el estudio se suele reducir a pendientes de ± 4 %.

En cuanto a sus características geométricas, en la tabla 7.41 se presentan los intervalos entre los que varían las más representativas. En el anexo IX se muestra el resto de características geométricas de las rectas evaluadas.

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
Longitud (m)	26	2543	576.26	497.60
Radio curva anterior (m)	63	13451	786.16	1865.00
Radio curva posterior (m)	52	13451	807.29	1826.14

Tabla 7.41 Rangos de las principales características geométricas de las rectas

Comparando estos valores con los resultantes del estudio de la Instrucción de Carreteras Española Norma 3.1-I.C (2000) para carreteras del Grupo 2, se pueden realizar las siguientes consideraciones:

- La longitud mínima establecida por el artículo 4.2 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 es superior a la longitud mínima encontrada en la muestra.
- La longitud máxima establecida por el artículo 4.2 de la Instrucción para una velocidad de proyecto de 80 km/h es 1336 m. Este valor es inferior a la longitud máxima encontrada en la muestra.

Tras estudiar la muestra utilizada para la modelización de la velocidad en rectas en investigaciones anteriores (tabla 7.42), se considera esta muestra de 78 rectas suficiente para el rango del estudio.

No obstante, hay ciertas casuísticas que no están cubiertas, como se verá a lo largo del estudio, con la muestra seleccionada.

	Muestra
Polus et al. (2000)	162
Ottesen y Krammes (2000)	78
Fitzpatrick y Collins (2000)	176
Jessen et al. (2002)	40

Tabla 7.42 Tamaños de muestra utilizados para la modelización de la velocidad en recta

7.3.2.2. Variables consideradas en el estudio de la velocidad en rectas

Como ya se ha comentado anteriormente, en la velocidad desarrollada en las rectas influyen multitud de variables, especialmente variables no geométricas.

El presente apartado hace una relación de las variables a considerar en el estudio de la velocidad en las alineaciones rectas. Para ello, las variables se dividen en dos tipologías, las propias de la geometría del trazado, obtenidas tras la restitución de la geometría de los diferentes tramos, y las variables relacionadas con el conductor, el vehículo y el viaje, que se han obtenido de las encuestas.

Variables relacionadas con la geometría del trazado

A continuación, se muestra un listado de las diferentes variables geométricas y las combinaciones de estas, utilizadas en el análisis de la velocidad en alineaciones rectas. Estas variables se clasifican como:

- Recta:
 - Longitud de la recta (m): L
 - Pendiente (tanto por uno)
- Curva anterior:
 - Sentido de giro de la curva: horario/antihorario
 - Longitud de la curva (m): L_{C1}
 - Ángulo de deflexión (gon): γ_1
 - Tasa de cambio de curvatura de la curva, incluyendo a la curva circular y las curvas de transición (gon/km): CCR_{C1}
 - Curva circular:
 - Radio (m): R_1
 - Curvatura: la inversa del radio (m^{-1})
 - Longitud de la curva circular (m): L_{CC1}
 - Clotoide anterior:
 - Longitud de la clotoide (m): $L_{CL1,1}$
 - Parámetro de la clotoide (m): $A_{1,1}$
 - Clotoide posterior:
 - Longitud de la clotoide (m): $L_{CL1,2}$
 - Parámetro de la clotoide (m): $A_{1,2}$
- Curva posterior:
 - Sentido de giro de la curva: horario/antihorario
 - Longitud de la curva (m): L_{C2}
 - Ángulo de deflexión (gon): γ_2

- Tasa de cambio de curvatura de la curva, incluyendo a la curva circular y las curvas de transición (gon/km): CCR_{C2}
- Curva circular:
 - Radio (m): R_2
 - Curvatura: la inversa del radio (m^{-1})
 - Longitud de la curva circular (m): L_{CC2}
- Clotoide anterior:
 - Longitud de la clotoide (m): $L_{CL2,1}$
 - Parámetro de la clotoide (m): $A_{2,1}$
- Clotoide posterior:
 - Longitud de la clotoide (m): $L_{CL2,2}$
 - Parámetro de la clotoide (m): $A_{2,2}$
- Tramo (el cálculo de las tasas es similar al explicado en el caso de curvas):
 - Tasa de cambio de curvatura del tramo en el que se encuentra (gon/km), según la tramificación realizada y que se recoge en el anexo V: CCR
 - Tasa de cambio de curvatura considerando la recta y las dos curvas adyacentes (gon/km) : $CCR_{C,R,C}$
 - Tasa de cambio de curvatura de los 100 metros anteriores al inicio de la recta (gon/km): $CCR_{100inicio}$
 - Tasa de cambio de curvatura de los 200 metros anteriores al inicio de la recta (gon/km): $CCR_{200inicio}$
 - Tasa de cambio de curvatura de un tramo de 100 metros centrado en el punto medio de la recta (gon/km): $CCR_{100ctro}$
- Combinación de variables. En el estudio de correlación realizado entre las variables geométricas y la velocidad de operación en rectas, se ha comprobado que las variables con mayor influencia son la longitud de la recta y el radio y longitud de las dos curvas adyacentes. Sin embargo, ninguna de ellas ha presentado una correlación del orden de magnitud de las que se han observado en el caso de la velocidad de operación en curvas. Por ello, se han desarrollado diferentes índices geométricos que combinan las variables más representativas, con el fin de englobar en una sola variable el carácter de la carretera, esperando obtener de esta forma una mayor correlación con la velocidad de operación en rectas:
 - GM es una variable geométrica similar a la utilizada en el modelo de Polus et al. (2000), definida por la ecuación 76.

$$GM = \frac{\left[L \cdot (R_1 \cdot R_2)^{\frac{1}{2}} \right]}{100} \quad (76)$$

- GI1 es un índice geométrico calculado según la ecuación 77.

$$GI1 = L \cdot (R_1 + R_2)^{\frac{1}{2}} \quad (77)$$

- GI2 es un índice geométrico calculado según la ecuación 78.

$$GI2 = L \cdot (R_1 + R_2) \quad (78)$$

- GI3 es un índice geométrico calculado según la ecuación 79.

$$GI3 = \frac{R_1 + R_2}{L_{C1} + L + L_{C2}} \quad (79)$$

- GI4 es un índice geométrico calculado según la ecuación 80.

$$GI4 = \frac{L}{R_1 + R_2} \quad (80)$$

- GI5 es un índice geométrico calculado según la ecuación 81.

$$GI5 = \frac{L}{R_1 \cdot R_2} \quad (81)$$

- GI6 es un índice geométrico calculado según la ecuación 82.

$$GI6 = L \cdot \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (82)$$

- GI7 es un índice geométrico calculado según la ecuación 83.

$$GI7 = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (83)$$

Como se ha visto en el estado del arte, estudios anteriores han considerado en el análisis de la velocidad de operación en rectas la influencia de las características de la sección transversal. En el presente trabajo de investigación no se ha considerado esta variable ya que las diferencias entre las distintas localizaciones incluidas en la muestra son mínimas.

Se ha llevado a cabo un estudio de la correlación existente entre las diferentes variables citadas. La matriz resultante completa se encuentra en el anexo XIX.

Las conclusiones del análisis son muy similares a las obtenidas al analizar las variables geométricas con posible influencia en la velocidad de operación en curvas. Como en ese caso, se han obtenido altas correlaciones entre las diferentes características geométricas de las curvas. Asimismo, se han detectado correlaciones entre las diferentes tasas de cambio de curvatura y los ángulos de deflexión de las curvas adyacentes a las rectas.

También se han observado correlaciones entre varios de los índices de trazado mencionados y de estos con la longitud de la recta.

Finalmente, cabe señalar que, a diferencia de los resultados obtenidos por Polus et al. (2000), no se presenta correlación ni entre la longitud de la recta y los radios de las curvas adyacentes, ni entre el radio de la curva anterior y el radio de la curva posterior.

Variables relacionadas con el conductor, el vehículo y el viaje

De los datos procedentes de las encuestas realizadas a los conductores durante las jornadas de toma de datos, se van a utilizar las mismas variables que las utilizadas en el estudio de la velocidad en curvas:

- Conductor:
 - Sexo del conductor: hombre/mujer.
 - Edad del conductor (años).
 - Kilómetros conducidos al año: pocos/medio/muchos.
- Viaje:
 - Longitud del viaje: largo/medio/corto/ruta.
 - Frecuencia del viaje: habitual/no habitual.
 - Propósito del viaje: laboral/no laboral.
- Ocupantes:
 - Número de niños.
 - Número de adultos.
 - Número de ancianos.
- Vehículo:
 - Tipo de vehículo: turismo/todoterreno/monovolumen/furgoneta.

Únicamente se muestra una relación de las diferentes variables ya que su descripción se ha realizado en el apartado de tratamiento de datos.

7.3.2.3. Distribución de la velocidad en secciones recta

Como se ha descrito en el apartado relacionado con la velocidad en curvas, una de las hipótesis que suele asumirse en los estudios relacionados con la velocidad desarrollada en un tramo de carretera es que en una sección de la vía la distribución de velocidades puede considerarse normal. Esta hipótesis permite emplear los procedimientos estadísticos más habituales.

En este apartado se va a comprobar en qué grado esta hipótesis es cierta en el caso de las rectas.

Para ello, se ha analizado la distribución de velocidad en la sección central de las rectas utilizadas en el estudio. Para cada una de ellas se ha realizado un gráfico en el que se representa tanto el histograma de los datos (en frecuencia relativa para facilitar la visualización), como la distribución normal y la distribución normal acumulada, correspondientes al ajuste de la distribución normal para la media y la desviación típica de los datos en cada caso. La figura correspondiente a cada una de las secciones estudiadas se encuentran en el anexo X.

En la figura 7.106 se muestra, como ejemplo, la correspondiente a la recta R01101, es decir a la primera recta evaluada en el sentido de ida del primer tramo de carretera evaluado.

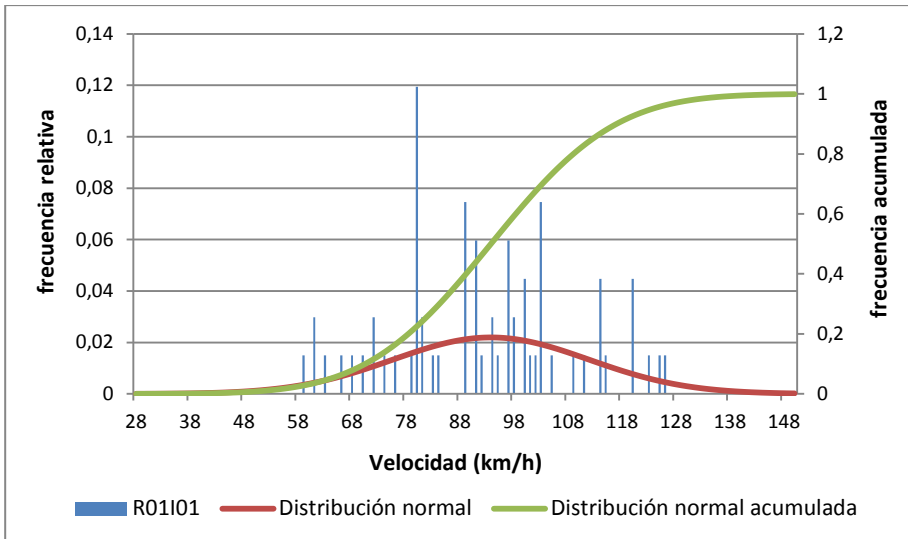


Figura 7.106 Distribución de velocidad de la sección central de la recta R0111

Como se ha mencionado en el estudio realizado en alineaciones curva, con estas figuras se puede intuir el ajuste de los datos a una distribución normal. Sin embargo, no se puede establecer con seguridad si el ajuste es bueno o no, ya que dependiendo de los intervalos utilizados para el dibujo del histograma la apariencia puede variar significativamente.

Para una mejor aproximación al análisis de normalidad de los datos, se ha realizado un estudio de la variable velocidad en cada una de las secciones, obteniendo los parámetros: recuento, promedio, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación, mínimo, máximo, rango, sesgo estandarizado y curtosis estandarizada. Estos estadísticos incluyen medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. En el caso del estudio de la normalidad de los datos, son de particular interés el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, que pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a $+2$ indican desviaciones significativas de la normalidad. En el anexo X se recoge una serie de tablas con los resultados para cada una de las secciones.

De las 78 secciones centrales de recta evaluadas, sólo 34 presentan valores de sesgo y curtosis dentro del rango. Sin embargo, únicamente 25 (32 % de las secciones) presentan alguno de los dos valores fuera del rango $(-3,+3)$.

Con el fin de completar el estudio de si la variable puede modelarse adecuadamente con una distribución normal, se ha llevado a cabo la prueba de Shapiro-Wilk, basada en la comparación de cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos, y la prueba de chi-cuadrado en la que se divide el rango de la variable en una serie de clases igualmente probables y se compara el número de observaciones en cada clase con el número esperado de observaciones. Los resultados de las pruebas se encuentran en el anexo X.

En ambas pruebas, en los casos en los que el valor-P es mayor o igual a 0.05, no se puede rechazar la idea de que la variable proviene de una distribución normal con 95 % de confianza.

De las 78 secciones, en 44 (56 %) rectas se puede aceptar la normalidad de los datos según alguna de las dos pruebas con un 95 % de confianza. De las restantes, en 19 secciones se puede aceptar con un 90 % de confianza.

Teniendo en cuenta el cumplimiento de alguno de los tres criterios analizados, en 84 % de los casos se puede aceptar que la variable velocidad se puede modelar según una distribución normal. Por tanto, se acepta como válida la normalidad de la velocidad en secciones recta.

Para finalizar con este apartado, se va a estudiar si la muestra de vehículos tomada en cada una de las secciones es suficientemente representativa, considerando la desviación típica calculada en cada una de ellas. Para ello, se calculará la muestra necesaria según la ecuación 84.

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 \cdot \sigma^2}{e^2} \tag{84}$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$: tiene el valor de 1.96 para el 95 % de confianza

σ : desviación típica

e : diferencia con la verdadera media asumido. En este caso se asumirá 5 km/h

En la tabla 7.43 se muestra para cada una de las curvas, la muestra necesaria y la muestra real.

	R01I01	R01I02	R01I03	R01I04	R01I05	R01I06	R01V01	R01V02	
Muestra real	67	67	66	67	67	76	85	85	
Muestra necesaria	51	25	34	29	28	67	33	21	
R01V03	R02I01	R02I02	R02V01	R03I01	R03I02	R03I03	R03I04	R03V01	R03V02
85	102	102	109	98	94	95	92	79	87
59	24	21	20	17	26	23	20	32	24
R03V03	R03V04	R04I01	R04I02	R04I03	R04I04	R04V01	R04V02	R04V03	R04V04
87	82	105	107	108	102	83	83	86	84
26	20	23	27	27	21	18	17	20	22
R04V05	R05I01	R05I02	R05I03	R05I04	R05I05	R05I06	R05V01	R05V02	R05V03
85	70	73	71	71	66	68	98	104	103
20	20	18	8	38	28	27	14	19	27

R05V04	R05V05	R06I01	R06V01	R06V02	R07I01	R07I02	R07I03	R07I04	R07I05
103	104	101	89	89	56	54	51	52	51
16	21	22	15	17	25	29	18	15	19
R07I06	R07V01	R07V02	R07V03	R07V04	R07V05	R07V06	R08I01	R08I02	R08I03
51	71	72	72	72	76	76	98	97	96
22	34	32	36	27	23	21	20	12	18
R08V01	R08V02	R08V03	R08V04	R08V05	R08V06	R09I01	R09I02	R09I03	R09I04
87	87	87	86	86	86	55	54	52	54
22	13	29	25	14	19	20	12	19	18
R09V01	R09V02	R10I01	R10I02	R10I03	R10I04	R10V01	R10V02	R10V03	R10V0
48	46	68	72	67	66	51	52	51	54
24	20	11	11	14	13	17	14	18	13

Tabla 7.43 Muestra necesaria vs muestra real en secciones recta

En todos los casos la muestra de datos tomada es suficiente para la desviación típica que se ha obtenido, asumiendo un error de 5 km/h. Se ha comprobado que, incluso para un error de 3 km/h, la muestra sería suficiente en el 70 % de los casos.

7.3.2.4. Modelización de la media de la velocidad en secciones recta

En este apartado se va a calibrar un modelo que permita estimar la media de la distribución de velocidades en una sección recta en función de las características geométricas del trazado.

Los valores de velocidad utilizados para esta calibración se han calculado, para cada una de las rectas mencionadas anteriormente, como el promedio de las velocidades medias calculadas en intervalos de 5 metros en la zona de la recta en la que la velocidad se mantiene aproximadamente constante.

Influencia de las variables relacionadas con la geometría del trazado

Se ha estudiado, mediante un análisis de correlación, la influencia de cada una de las características geométricas del trazado, citadas al inicio de este apartado, con la media de la velocidad en las rectas estudiadas.

En la tabla 7.44 se muestran los resultados del análisis de correlación para las variables en las que la correlación con la media es significativamente diferente de cero, con un nivel de confianza del 95 %.

	correlación	tamaño muestra	Valor-p
$L+L_{CL1,2}+L_{CL2,1}$	0.5867	78	0
L	0.5461	78	0
$L_{CL1,2}$	0.3881	74	0.0006

L_{CC2}	0.3232	73	0.0053
L_{CC1}	0.2936	74	0.0111
L_{CL2_1}	0.2846	73	0.0147
$CCR_{C_R_C}$	-0.378	77	0.0007
$CCR_{100inicio}$	-0.4081	74	0.0003

Tabla 7.44 Resultados del análisis de correlación de la velocidad media en rectas

Los resultados muestran, como se esperaba, que una de las variables que mayor correlación presenta con la velocidad media en rectas es su longitud. En la figura 7.107 se muestra la relación entre la longitud de la recta y la velocidad media en ella.

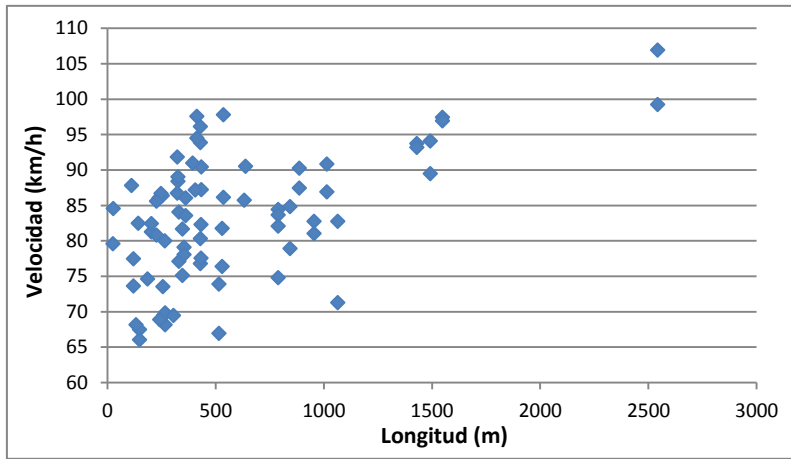


Figura 7.107 Longitud de la recta vs velocidad media en recta

Además de la longitud de la recta, también presentan correlación con la velocidad media en recta las longitudes de otros elementos: la primera clotoide de la curva posterior a la recta, la curva circular posterior, la curva circular anterior y la segunda clotoide de la curva anterior a la recta. Sin embargo, se ha encontrado una correlación bastante mayor con la suma de tres de ellas: la longitud de la recta y la longitud de las clotoides adyacentes (figura 108).

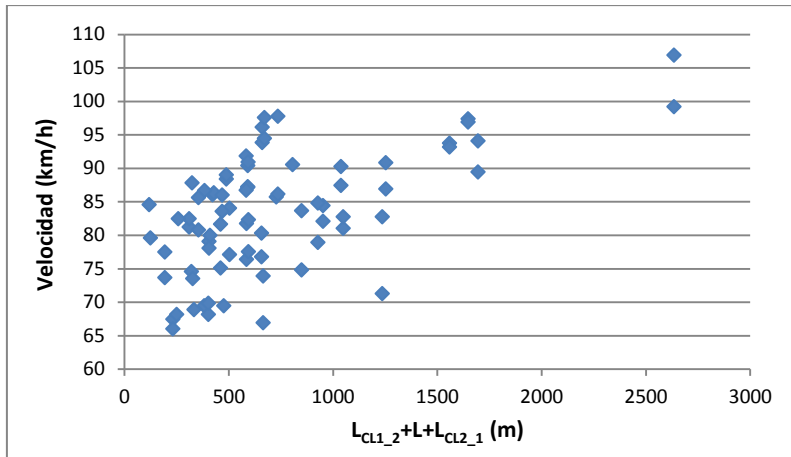


Figura 7.108 $L+L_{cl1,2}+L_{cl2,1}$ vs velocidad media en recta

Las variables citadas presentan correlaciones positivas, es decir, al aumentar el valor de estas variables aumenta el valor de la velocidad media en rectas.

Hay dos variables que presentan correlación negativa significativa con la velocidad media. Estas variables son la tasa de cambio de curvatura del tramo formado por la recta y las curvas adyacentes, y la tasa de cambio de curvatura del tramo formado por los 100 metros antes del inicio de la recta.

La figura 7.109 muestra la relación entre la primera de ellas y la velocidad media en rectas.

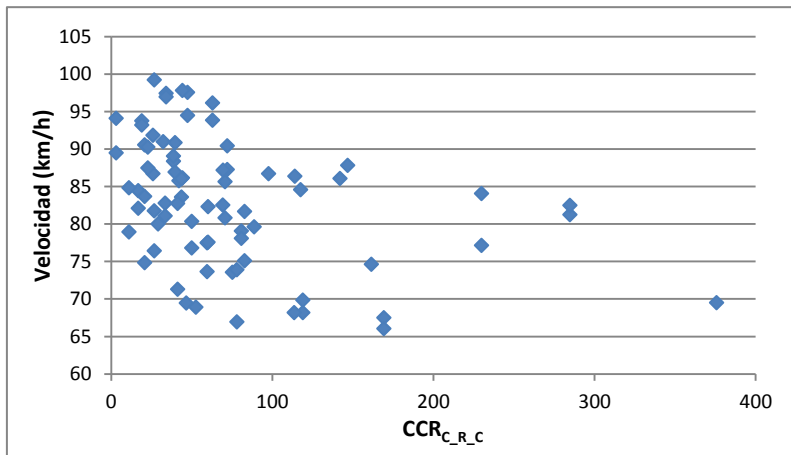


Figura 7.109 $CCR_{C,R,C}$ vs velocidad media en recta

La relación entre la velocidad media en recta y la tasa de cambio de curvatura del tramo formado por los 100 metros antes del inicio de la recta aparece en la figura 7.110.

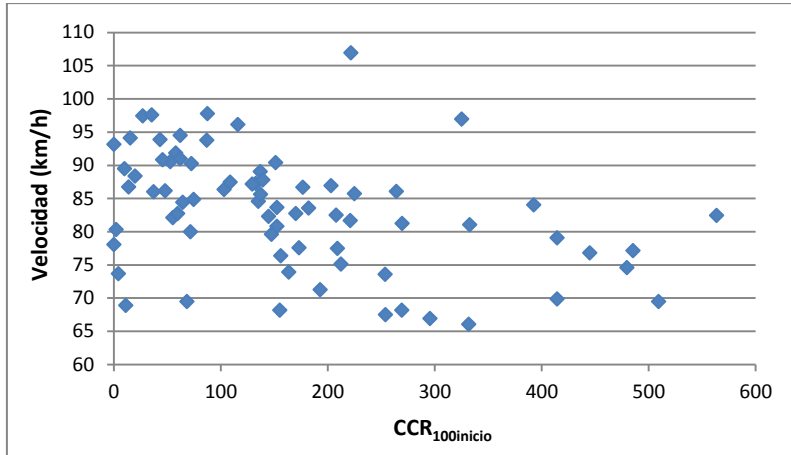


Figura 7.110 CCR_{100inicio} vs velocidad media en recta

Como puede observarse, en el caso de las rectas, la relación entre la velocidad media y las diferentes variables no presenta una tendencia tan clara como en el caso de las curvas. Además, destaca del análisis de correlación que los radios de las curvas adyacentes no han resultado significativos.

Modelización de la media de la velocidad en secciones recta

Una vez estudiadas las relaciones entre las diferentes variables geométricas y la velocidad media en rectas, el siguiente paso consiste en la calibración de modelos que hagan viable su estimación en tramos de carretera en los que no se tengan datos de velocidad.

La calibración de estos modelos se centra en las variables que han resultado tener más correlación con la velocidad media. Tras el análisis de los posibles modelos, el que más variabilidad explica de la velocidad media, con un R² de 37.11 % y un R² ajustado de 36.28 %, viene definido por la ecuación 85.

$$V_M = \sqrt{5726.48 + 1.79155 \cdot (L + L_{CL1_2} + L_{CL2_1})} \tag{85}$$

A pesar de que el coeficiente de correlación es bajo, es el más alto de los modelos estudiados. Este bajo coeficiente de correlación es propio de los modelos de velocidad en rectas ya que la dependencia de las variables geométricas no es tan alta como en el caso de curvas.

La representación del modelo seleccionado se muestra en la figura 7.111.

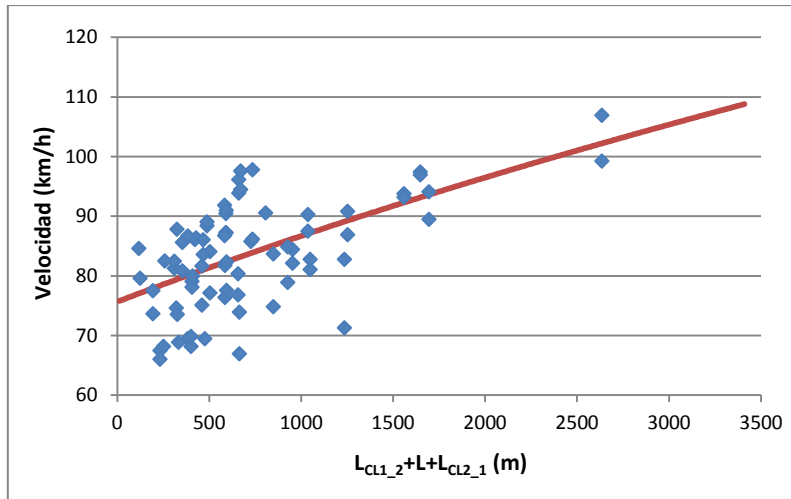


Figura 7.111 Modelo para la estimación de la velocidad media en una recta con la suma de la longitud de la recta y las clotoides adyacentes como variable explicativa

Como puede observarse, el modelo no es asintótico sino que crece continuamente con longitud. Esto puede conllevar que para valores de la longitud alta las velocidades resultantes sean completamente desproporcionadas. Por ello, como ya se ha citado anteriormente para el resto de modelos, la validez del modelo únicamente puede garantizarse en el rango al que pertenecen los datos a partir de los que se ha calibrado.

7.3.2.5. Modelización de la desviación típica de la velocidad en secciones recta

Una vez definido el modelo con el que estimar la velocidad media en rectas, para definir completamente la distribución de la velocidad, asumida normal, es necesario modelizar también la desviación típica de la distribución.

Los valores de desviación típica de la distribución de velocidad utilizados para esta calibración se han calculado, para cada una de las rectas mencionadas anteriormente, como el promedio de las desviaciones típicas calculadas en intervalos de 5 metros en la zona en la que la velocidad se mantiene aproximadamente constante fuera de los tramos de aceleración y deceleración.

Influencia de las variables relacionadas con la geometría del trazado

Para el estudio de la influencia de cada una de las características geométricas del trazado, citadas al inicio de este apartado, en la desviación típica de la velocidad en las rectas estudiadas, se ha llevado a cabo un análisis de correlación.

En la tabla 7.45 se muestran los resultados del análisis de correlación para las variables en las que la correlación con la desviación típica es significativamente diferente de cero, con un nivel de confianza del 95 %.

	correlación	tamaño muestra	Valor-p
$L+L_{CL1,2}+L_{CL2,1}$	0.6731	78	0
L	0.6646	78	0
L_{CC1}	0.2468	74	0.0341
$CCR_{100\text{inicio}}$	-0.2375	74	0.0416

Tabla 7.45 Resultados del análisis de correlación de la desviación típica de la velocidad en rectas

En el caso de la desviación típica de la velocidad en secciones rectas, el número de variables con correlación significativa disminuye considerablemente respecto del resto de casos estudiados. Además, únicamente la longitud de la recta y la suma de la longitud de la recta y la longitud de las clotoides adyacentes presentan una correlación superior a 0.30. Por tanto, son estas en las que se ha basado el estudio posterior.

En la figura 7.112 se muestra la relación entre la desviación típica y la longitud comprendida por la recta y las clotoides adyacentes. En ella se aprecia como la desviación típica es aproximadamente igual para rectas con longitud inferior a 1300 metros, y a partir de ese valor la desviación aumenta con la longitud. No obstante, hay que tener en cuenta que el número de estas rectas es reducido y por lo tanto su representatividad.

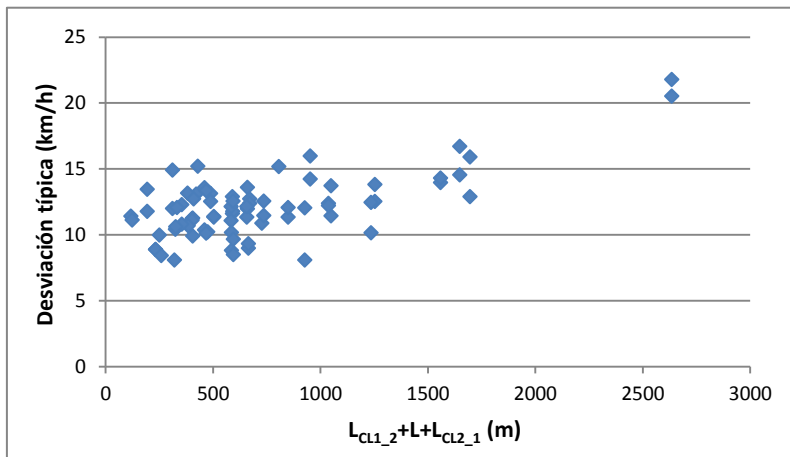


Figura 7.112 $L+L_{CL1,2}+L_{CL2,1}$ vs desviación típica en recta

Obviamente, este comportamiento se refleja también en la relación entre la desviación típica de la velocidad y la longitud de la recta, como se observa en la figura 7.113. En ella, se aprecia cómo para rectas con longitud inferior a 1100 metros, aproximadamente, la desviación típica es similar, mientras que a partir de 1400 metros, la desviación típica aumenta con la longitud de la recta.

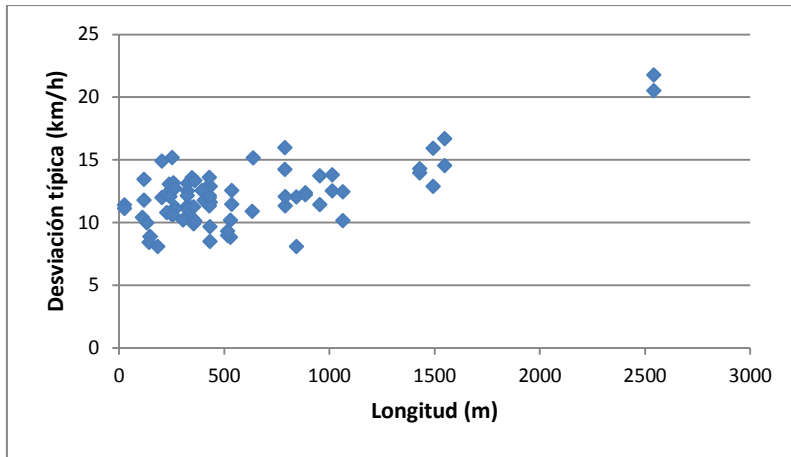


Figura 7.113 Longitud de la recta vs desviación típica de la velocidad en recta

Modelización de la desviación típica de la velocidad en secciones recta

El estudio de las relaciones entre las diferentes variables geométricas y la desviación típica de la velocidad en rectas ha concluido que las variables que mayor correlación presentan son la longitud de la recta y la longitud abarcada por la recta y las clotoideas adyacentes. En la representación gráfica de ambas relaciones se aprecia una misma tendencia en ambas y la correlación que presentan es muy similar.

Por tanto, considerando que en muchos casos las clotoideas no son fácilmente identificables en una restitución de la geometría de la vía y que la mejora obtenida al incorporar esta variable es mínima en este caso, el modelo para la estimación de la desviación típica de la velocidad en rectas se ha realizado con la longitud de la recta como variable explicativa.

El modelo resultante presenta un R^2 de 63.40 %. Sorprendentemente, la modelización de la desviación típica en rectas explica una variabilidad mucho mayor a la que se ha explicado para la velocidad media en rectas e incluso para la velocidad media y la desviación típica en curvas, donde no se ha superado el 55 %. Este modelo se define por la ecuación 86.

$$\sigma_v = \sqrt{124.982 + 0.000046576 \cdot L^2} \quad (86)$$

Su representación gráfica junto los datos calibrados se presenta en la figura 7.114.

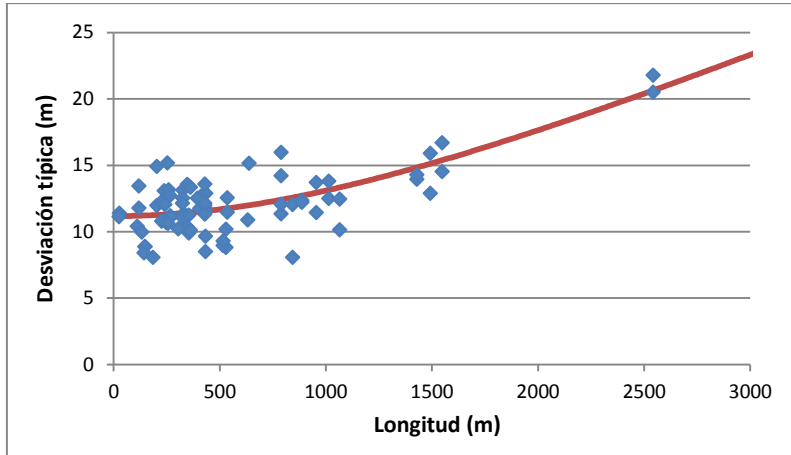


Figura 7.114 Modelo para la estimación de la desviación típica de la velocidad en una recta con su longitud como variable explicativa

La combinación de los modelos presentados para la media y la desviación típica de la velocidad permite estimar la distribución de la velocidad en una alineación recta en función de las características geométricas del trazado, cuando no se disponen de datos de velocidad.

7.3.2.6. Modelización de la V_{85} en secciones recta

Mediante la estimación de la distribución de la velocidad en alineaciones recta a partir de los dos modelos anteriores es posible estimar cualquier percentil, entre ellos el percentil 85 de la velocidad. El valor de este percentil se corresponde aproximadamente con el valor de la media más la desviación típica.

Sin embargo, como ya se ha mencionado, así se estaría realizando una estimación a partir de estimaciones, por lo que el error podría ser demasiado grande. Por ello, al igual que en el caso de las alineaciones curva, se ha modelizado el percentil 85 de la velocidad desarrollada por los conductores circulando en flujo libre en las alineaciones rectas.

Los datos utilizados para la calibración de estos modelos se han calculado, para cada recta, como la media de las velocidades del perfil de velocidad correspondiente al percentil 85 en la zona de la recta donde la velocidad se mantiene prácticamente constante, fuera de los tramos de aceleración y deceleración. Se ha procedido de esta forma y no se ha tomado la velocidad máxima de cada recta para evitar máximos puntuales anómalos. Todo ello, ha sido posible gracias a la disponibilidad de perfiles continuos de velocidad en lugar de datos puntuales.

En la figura 7.115 se muestra un ejemplo, perteneciente al tramo de toma de datos 4, en el que se aprecia cómo si se tomara la velocidad máxima en la recta sería debido a un dato anómalo y, por tanto, se estaría cometiendo un error.

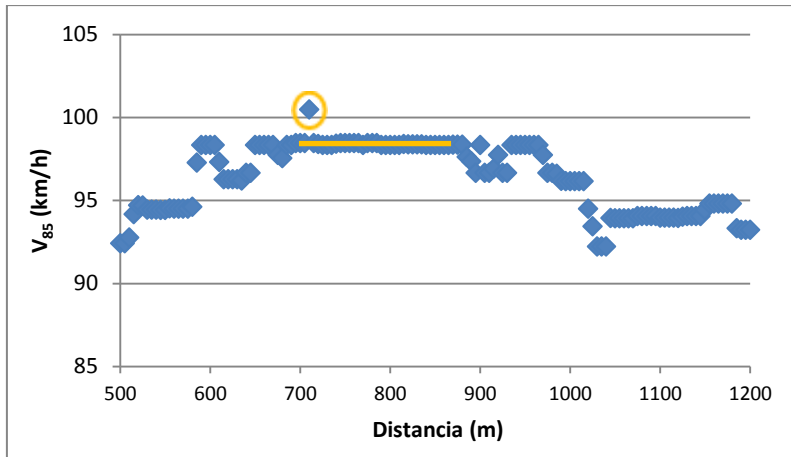


Figura 7.115 Obtención de la velocidad de operación en rectas a partir del perfil de velocidad de operación

Influencia de las variables relacionadas con la geometría del trazado

El paso previo a la modelización de la velocidad de operación en las alineaciones rectas es el estudio de los datos y de las relaciones entre la variable a modelizar y las variables geométricas.

En el estudio de los datos de velocidad de las rectas se han observado dos rectas con longitud inferior a 30 m, que presentan una velocidad superior a la que sería esperable. Esta situación se produce debido a que las curvas adyacentes tienen un radio muy amplio. Teniendo esto en cuenta y considerando que la longitud mínima establecida por la Instrucción 3.1 I-C es 56 metros, para una velocidad de proyecto de 40 km/h, las rectas R03I04 y R09I03 se eliminan del estudio. De esta forma, la muestra queda reducida a 76 rectas, con una longitud mínima de 111 metros.

A partir de los datos de la muestra se ha realizado un estudio de correlación entre la velocidad de operación calculada en las rectas y las variables geométricas del trazado correspondiente.

En la tabla 7.46 se muestran las variables que presentan una correlación con la velocidad de operación en rectas significativamente diferente de cero con un nivel de confianza del 95 %.

	correlación	tamaño muestra	Valor-p
L	0.6332	76	0.0000
G11	0.4879	67	0.0000
L_{CL1_2}	0.3381	72	0.0037
GM	0.3223	67	0.0078
G12	0.3189	67	0.0085
L_{CC1}	0.3032	72	0.0096

L_{CC2}	0.2996	71	0.0111
$CCR_{C_R_C}$	-0.3073	75	0.0073
$CCR_{100inicio}$	-0.3334	72	0.0042

Tabla 7.46 Resultados del análisis de correlación de la V_{85} en rectas

Del análisis se desprende, como se esperaba, que la variable que mayor correlación presenta con la velocidad de operación en rectas es la longitud de esta, seguida de algunos de los índices geométricos definidos anteriormente calculados a partir de diferentes combinaciones de la longitud de la recta y de los radios de las curvas adyacentes. También presentan cierta correlación la longitud de las curvas adyacentes.

Con el fin de mostrar las relaciones más representativas, se presentan a continuación las gráficas de las relaciones entre la velocidad de operación en rectas con la longitud de esta, con los índices geométricos $GI1$ y GM , y con las dos tasas de cambio de curvatura mostradas en la tabla 7.34 que presentan correlación negativa.

En la figura 7.116 se muestra la relación entre la longitud de la recta y la velocidad desarrollada en ella. Se observa un incremento de la velocidad con la longitud de la recta, especialmente debido a los datos de mayores longitudes. En rectas con longitudes menores esta relación es menos evidente.

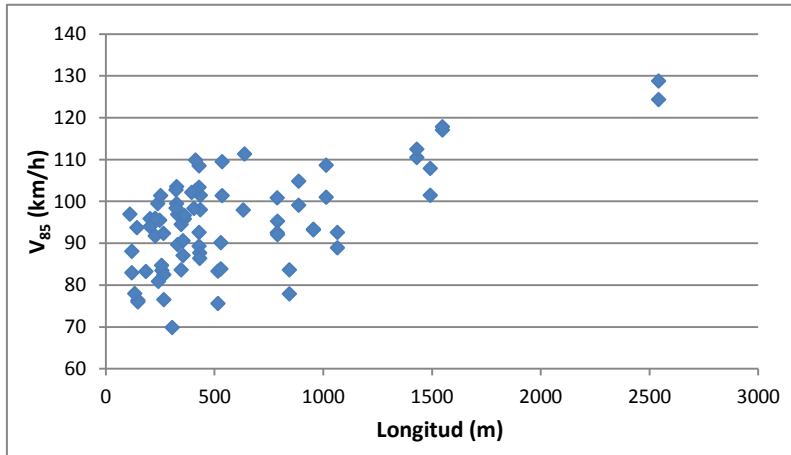


Figura 7.116 Longitud de la recta vs V_{85} en recta

La tendencia es menos clara en la gráfica de la figura 7.117 en la que se relaciona la velocidad de operación con el índice geométrico $IG1$ y en la de la figura 7.118 con el índice geométrico GM .

En ambas se observa dos datos que por el valor de su índice geométrico deberían presentar una velocidad considerablemente inferior a la registrada. Esto es debido a que se trata de rectas de mucha longitud situadas al inicio/final del tramo de toma de datos. Al estar situadas al inicio/final del tramo no existe una curva anterior/posterior

con cuyo radio calcular los índices. Para solventar este problema, en las situaciones con esta configuración se ha considerado un radio de 20 metros. Con un radio de valor tan reducido los índices geométricos también lo son, arrojando valores que no tienen por qué corresponderse con la realidad. Por ello, las rectas que se encuentran al inicio o final del tramo de estudio no se han considerado en el análisis si en este era necesario realizar algún cálculo con el radio ausente.

Respecto a la tendencia observada, en ambas gráficas la tendencia es creciente, salvo por los dos últimos datos que presentan un elevado valor del índice con velocidades no tan altas como les debería corresponder. Por tanto, tras el análisis de los datos, se puede concluir que los modelos desarrollados a partir de los índices no van a comportarse adecuadamente con rectas de gran longitud, especialmente cuando los radios de las curvas adyacentes también son grandes.

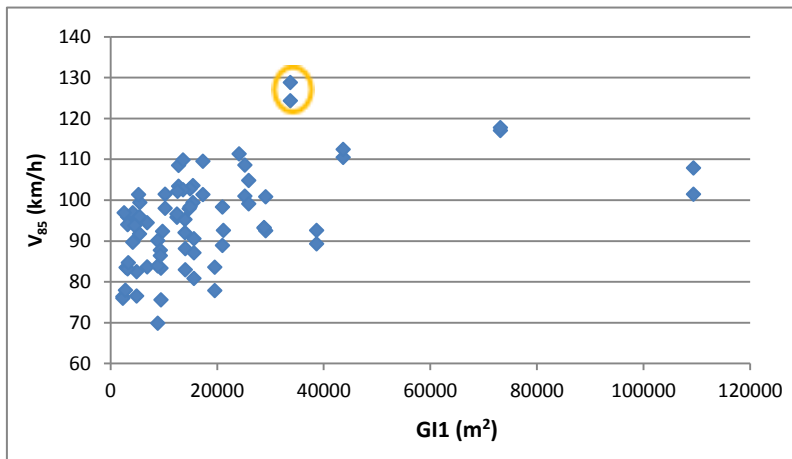


Figura 7.117 Índice $G1$ vs V_{85} en recta

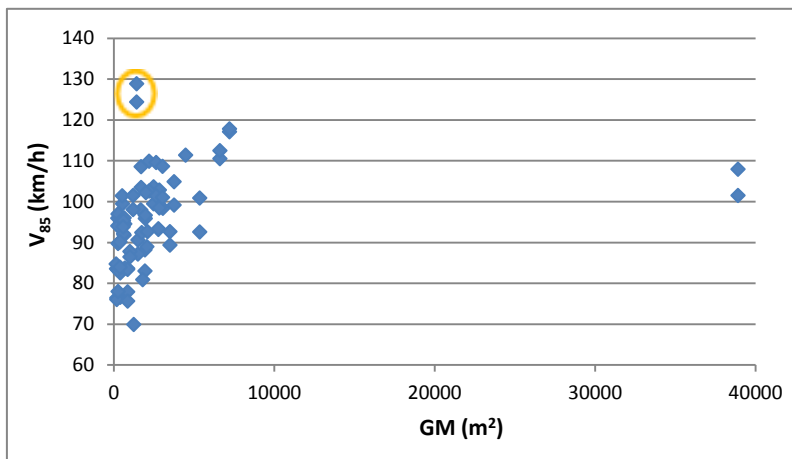


Figura 7.118 Índice GM vs V_{85} en recta

Por otra parte, como ya se ha mencionado, las tasas de cambio de curvatura del tramo 100 metros antes del inicio de la recta (figura 7.119) y del tramo comprendido por la recta y las curvas adyacentes (figura 7.120) presentan una correlación negativa con la velocidad.

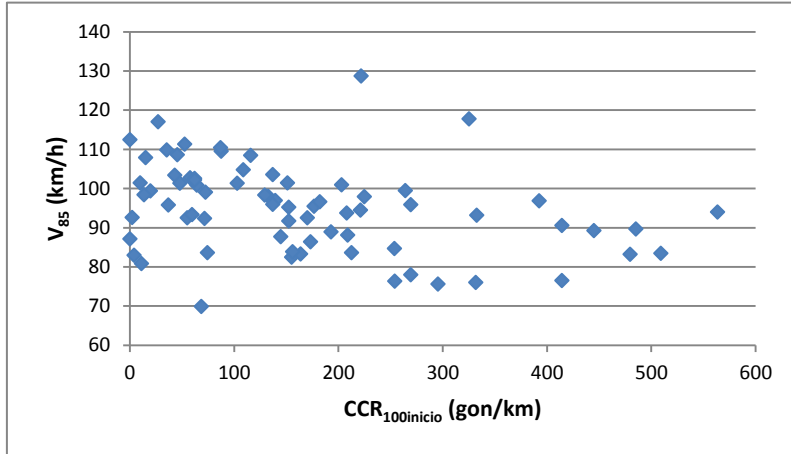


Figura 7.119 $CCR_{100inicio}$ vs V_{85} en recta

En la primera de ellas, hay dos rectas que presentan una velocidad más alta de lo que cabría esperar por el comportamiento del resto. Se debe a que este parámetro únicamente tiene en cuenta las características de los elementos antes de la recta, no considerando la longitud de esta. Por tanto, al utilizar este parámetro, en una recta con una curva anterior de radio reducido nunca podrían desarrollarse velocidades altas por muy larga que fuera su longitud. Debido a esto, esta tasa de cambio de curvatura no va a utilizarse en la modelización.

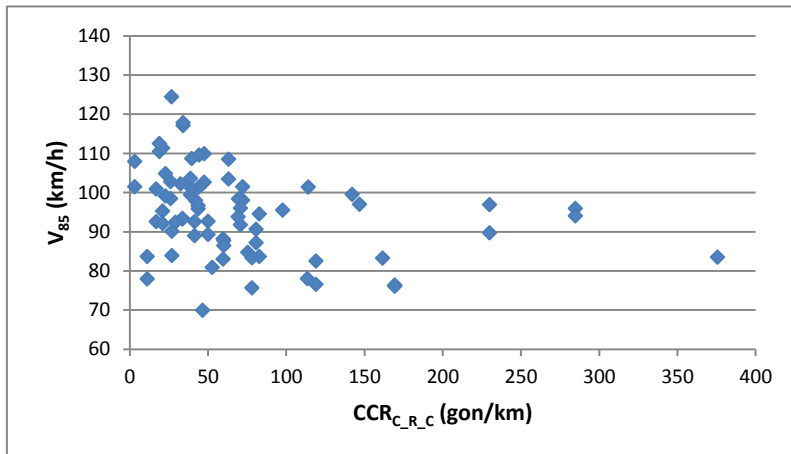


Figura 7.120 $CCR_{c_r_c}$ vs V_{85} en recta

En la figura 7.120 se intuye una tendencia decreciente de la velocidad de operación en rectas al aumentar la tasa de cambio de curvatura del tramo comprendido por la recta y las curvas adyacentes. Sin embargo, esta tendencia que parece clara hasta un valor del parámetro alrededor de 100, no lo es a partir de él.

Modelización de la V_{85} en secciones recta

Después de analizar las diferentes relaciones entre las variables geométricas definidas y la velocidad de operación desarrollada en tramos rectos, en este subapartado se procede al desarrollo y calibración de modelos que hagan factible su estimación.

Para la calibración de los modelos se tomarán los datos de velocidad de operación de las rectas que aparecen en la tabla 7.43 de más de 100 metros, por los motivos mencionados anteriormente. Por tanto, la muestra utilizada para la calibración son 76 tramos rectos de diferentes carreteras convencionales.

En la fase inicial de la modelización se han evaluado los diferentes modelos basados en regresión lineal simple que pueden calibrarse a los datos de la muestra, tomando como variables explicativas las descritas en el apartado anterior. Entre estos modelos, los que mejores resultados han presentado se detallan en la tabla 7.47.

Modelo	Expresión	R ²	R ² ajustado
R1	$V_{85} = 86.489 + 0.0147475 \cdot L$	40.09%	39.29%
R2	$V_{85} = \sqrt{7399.27 + 3.03956 \cdot L}$	44.73%	43.98%
R3	$V_{85} = \sqrt{1710.73 + 1020.71 \cdot \ln(GM)}$	35.61%	34.62%
R4	$V_{85} = \sqrt{-2583.31 + 1246.43 \cdot \ln(GI)}$	33.23%	32.20%

Tabla 7.47 Modelos de regresión lineal simple para la estimación de la V_{85} en rectas

El modelo R1 depende directamente de la longitud de la recta dando como resultado un recta creciente con la longitud, mientras que el modelo R2 está basado en la transformación cuadrática de la variable dependiente, dando como resultado una curva. Sin embargo, la diferencia entre ambos modelos es imperceptible debido a que la curvatura del segundo es mínima, apareciendo en el rango de los datos prácticamente como una recta. La comparación de estos modelos puede observarse en la figura 7.121.

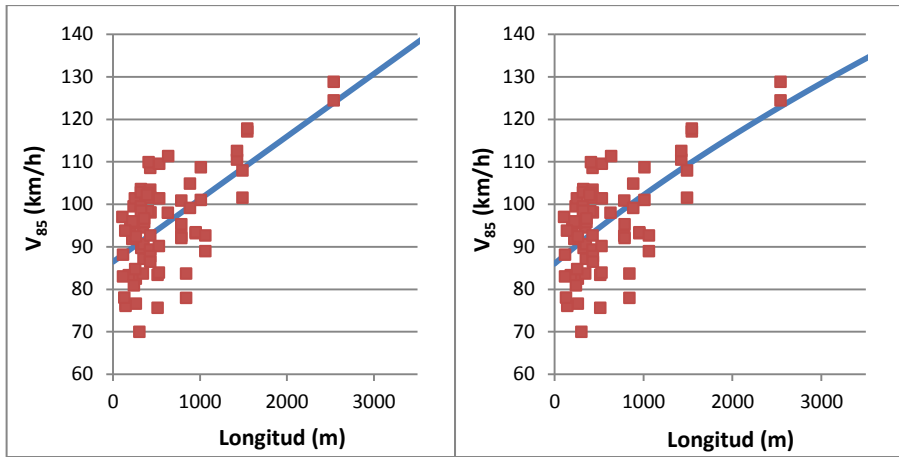


Figura 7.121 Modelos de regresión lineal para la estimación de la V_{85} en rectas: R1 y R2

El resto de los modelos presentados están basados en la transformación cuadrática de la variable dependiente y en la transformación logarítmica de los índices geométricos. Los modelos resultantes se muestran en la figura 7.122.

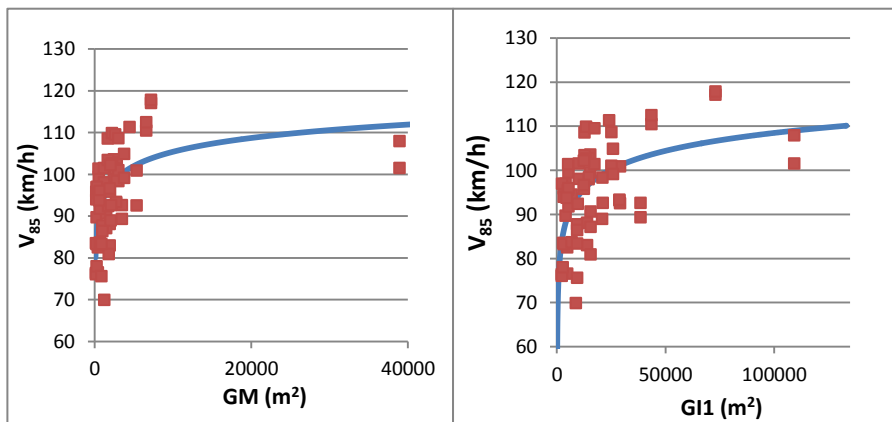


Figura 7.122 Modelos de regresión lineal para la estimación de la V_{85} en rectas: R3 y R4

Como cabía esperar tras el estudio de la influencia de estas variables en la velocidad realizado en el subapartado anterior, los datos correspondientes a los valores altos de los índices tienen una gran influencia en el modelo que provoca que el ajuste al resto de datos no sea tan bueno como debería. Además, como también se ha mencionado, hay rectas de la muestra que no aparecen en este modelo por encontrarse en el inicio o en el final del tramo estudio.

Por tanto, de los modelos anteriores el que mejor se ajusta a los datos de la muestra es el modelo R2.

Tras un análisis más detallado de los datos y de los posibles modelos para su ajuste, se ha observado un comportamiento diferente entre las rectas con longitud inferior a 700 metros y rectas con longitud superior a este valor.

En la figura 7.116, en la que se relaciona la velocidad de operación en rectas con la longitud de estas, se observa cómo, mientras para rectas de una longitud mayor la velocidad de operación crece claramente con la longitud, en las rectas con una longitud menor la tendencia se reduce a una nube de puntos. Por ello, se considera que, en este grupo de rectas, la velocidad de operación no sólo depende de la longitud de la recta sino que otras variables pueden tener una influencia determinante.

Asimismo, en el proceso de calibración de los modelos para la estimación de la velocidad de operación en rectas, se ha observado que las rectas estudiadas pueden dividirse en dos grupos: longitudes mayores o menores de 700 metros. Al introducir valores de uno de estos grupos en la calibración de modelos para la estimación de la velocidad de operación de las rectas del otro grupo, el R^2 disminuye considerablemente.

Longitud de recta mayor o igual a 700 metros

Con la limitación de longitud, la muestra para la calibración de estos modelos se ha reducido a 22 rectas. Con esta muestra, tras el estudio de diferentes alternativas, para la modelización de la velocidad de operación en rectas con longitud igual o superior a 700 metros, se han calibrado los modelos que aparecen en la tabla 7.48, junto con el coeficiente de correlación y el coeficiente de correlación ajustado asociado.

Modelo	Expresión	R^2	R^2 ajustado
R5	$V_{85} = \sqrt{-1464.72 + 351.288 \cdot \sqrt{L}}$	74.24%	72.95%
R6	$V_{85} = 135 - 86.0971 / e^{0.000846915 \cdot L}$	70.13%	68.63%

Tabla 7.48 Modelos para la estimación de la V_{85} en rectas con longitud igual o mayor a 700 metros: R5 y R6

El primero de ellos es un modelo de regresión lineal basado en transformaciones tanto de la variable dependiente como independiente, mientras que para la calibración del segundo se ha llevado a cabo una regresión no lineal. La representación de ambos modelos se muestra en la figura 7.123.

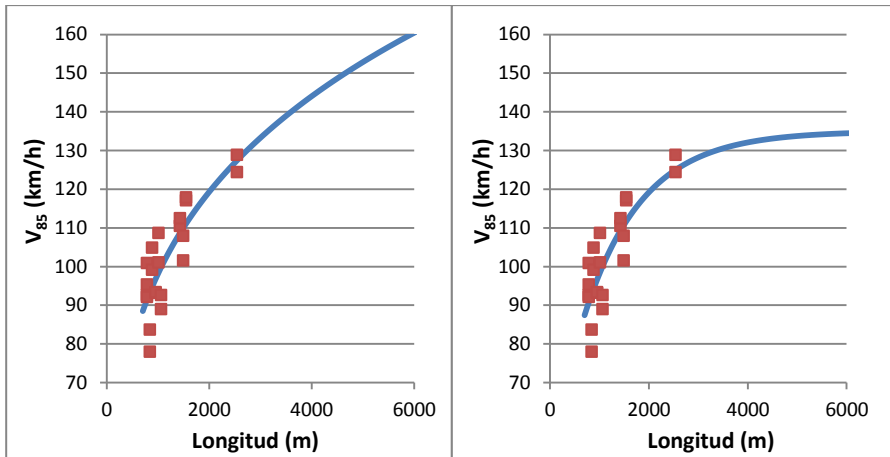


Figura 7.123 Modelos de regresión para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud mayor o igual a 700 m: R5 y R6

Al comparar ambos modelos, se observa como el modelo R5 se ajusta mucho mejor a los datos de la muestra que el modelo R6. Sin embargo, el comportamiento del modelo R6 se ajusta mejor al fenómeno de la velocidad en rectas, consistente en el aumento de esta con la longitud de la recta hasta alcanzar un límite, que en este caso sería 135 km/h, generalmente identificado con la velocidad deseada.

Longitud de recta menor a 700 metros

El número de rectas restante para el análisis del comportamiento de las rectas con longitud menor de 700 metros es 54. Al estudiar estos datos con detenimiento y tras la evaluación de los datos anómalos en la fase inicial de modelización, se ha eliminado del estudio la recta R06V01. Esta recta se encuentra en una zona con urbanizaciones a ambos lados, circunstancia que, a pesar de no existir accesos de consideración, puede influir en el comportamiento de los conductores manifestado por una velocidad de operación inferior a la esperada.

Con todo ello, la muestra de rectas se reduce a 53 datos. Estos datos han sido sometidos a un análisis más profundo, detectando un comportamiento distinto en aquellas rectas con un radio de la curva anterior superior a 600 metros a aquellas con un radio inferior a este.

De hecho, como puede observarse en las figuras 7.124 y 7.125, en el grupo de rectas de la muestra con longitud de recta inferior a 700 m y radio de la curva anterior superior a 600 m, la velocidad de operación aumenta al aumentar el ángulo de deflexión de la curva anterior y disminuye al aumentar el radio de esta misma curva.

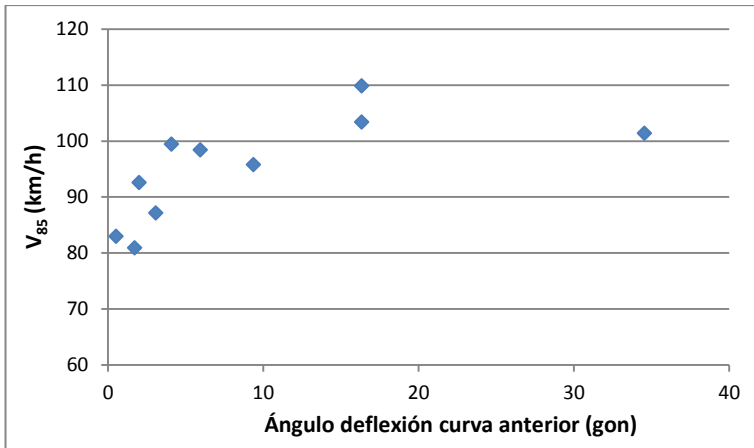


Figura 7.124 Ángulo de deflexión de la curva anterior vs V_{85} en rectas de longitud menor a 700 m y radio de la curva anterior superior a 600 m

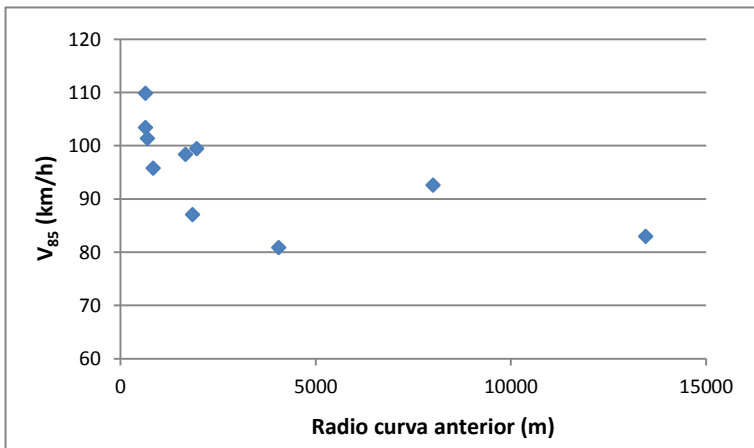


Figura 7.125 Radio de la curva anterior vs V_{85} en rectas de longitud menor a 700 m y radio de la curva anterior superior a 600 m

Por tanto, en el análisis de las rectas con longitud inferior a 700 metros se van a distinguir estos dos casos.

Durante la modelización de la velocidad de operación en rectas de longitud inferior a 700 metros y radio de la curva anterior inferior a 600 metros, se han evaluado diferentes modelos de regresión lineal simple, considerando las diferentes variables analizadas anteriormente. Sin embargo, la variabilidad explicada por estos modelos ha sido muy reducida, por lo que se han descartado.

Después de un arduo proceso de modelización, se han calibrado los modelos que aparecen en la tabla 7.49. Ambos dependen del índice geométrico GM y del radio de la curva anterior a la recta, pero con claras diferencias.

Modelo	Expresión	R ²	R ² ajustado
R7	$V_{85} = 132.639 - 899.971/R - 39.6487/e^{0.000116096 \cdot GM}$	41.76%	36.91%
R8	$V_{85} = 0.362739 \cdot V_{85C} + 59.6982/e^{-0.0000472302 \cdot GM}$	45.48%	42.53%
	$V_{85C} = 106.863 - 60.1185/e^{0.00422596 \cdot R}$		

Tabla 7.49 Modelos para la estimación de la V_{85} en rectas con longitud inferior a 700 metros y radio de la curva anterior inferior a 600 metros: R7 y R8

Para el desarrollo del segundo de los modelos se ha estudiado la incorporación de cada uno de los modelos calibrados para la estimación de la velocidad en tramos curvos, siendo el que se presenta el que ha arrojado mejores resultados.

En las figuras 7.126 y 7.127 se representan los modelos R7 y R8 calibrados. Como puede verse, ninguno de ellos se adapta adecuadamente a los datos con los que han sido calibrados. Sin embargo, los dos muestran cómo al aumentar el radio de la curva anterior aumenta la velocidad desarrollada en la recta y, además, para un mismo valor del radio, dan como resultado una velocidad mayor para aquellas rectas en las que la longitud es mayor. Con todo ello, se considera que representan adecuadamente el funcionamiento de la velocidad de operación en rectas, explicando en el segundo de los casos un 45 % de la variabilidad de la velocidad. Este porcentaje puede entenderse como alto en el caso de la estimación de la velocidad en rectas en la que, como se ha comentado en el estado del arte, la influencia de la geometría del trazado es minoritaria.

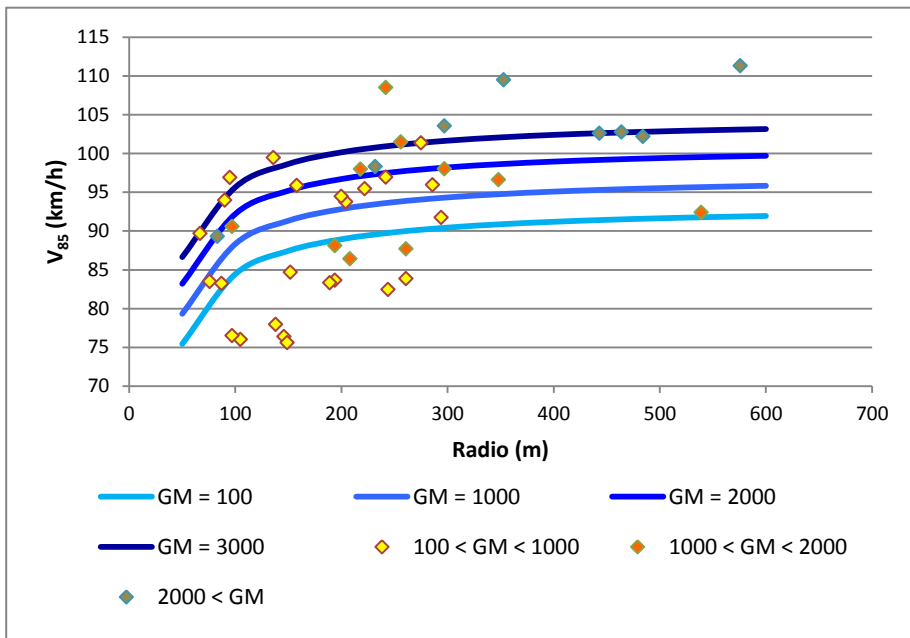


Figura 7.126 Modelo de regresión múltiple para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud inferior a 700 m y radio de la curva anterior inferior o igual a 600 m: R7

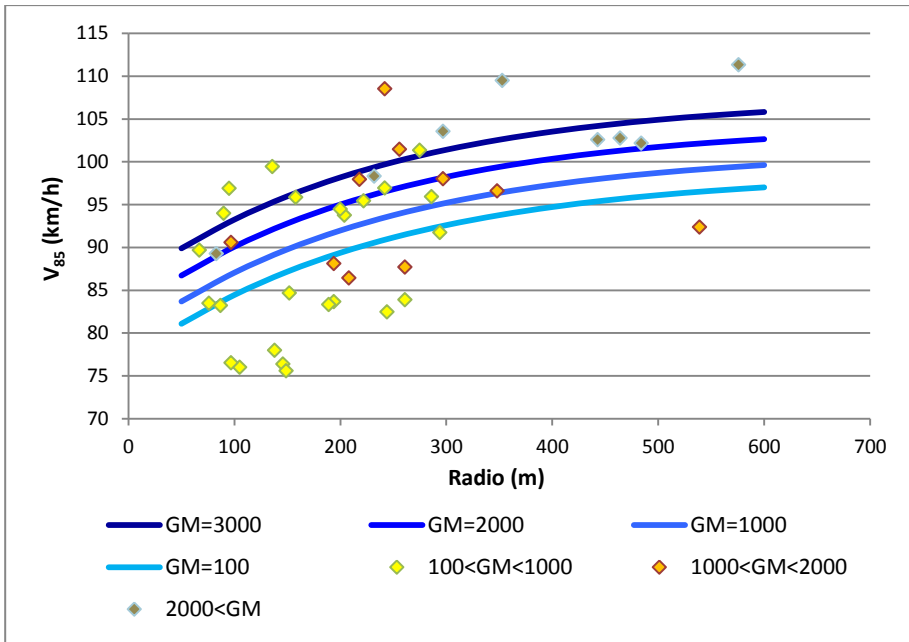


Figura 7.127 Modelo de regresión no lineal para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud inferior a 700 m y radio de la curva anterior inferior o igual a 600 m: R8

Por otro lado, se ha realizado un análisis de los datos correspondientes a rectas con una longitud inferior a 700 metros cuando el radio de la curva anterior es superior a 600 metros. En este caso la muestra se reduce a 11 rectas.

En ellas, a pesar de que la velocidad aumenta con la longitud de la recta, se han detectado ciertos comportamientos fuera de lo normal, destacando el hecho de que la velocidad de operación en la recta disminuye al aumentar el radio de la curva anterior. De forma similar ocurre con el ángulo de deflexión: al aumentar este aumenta también la velocidad, como se ha mencionado anteriormente. En todos los casos se trata de curvas con un ángulo muy pequeño que necesitarán un estudio posterior en profundidad.

Hasta obtener resultados de ese estudio, se considera que el modelo R2 calibrado con la muestra total de las rectas puede aplicarse para la estimación de la velocidad en estas rectas, ya que depende únicamente de la longitud de la recta y frente a esta variable el comportamiento es el esperado, como muestra la figura 7.128. Además, la calibración con una muestra de rectas tan reducida daría como resultado un modelo con una baja aplicabilidad.

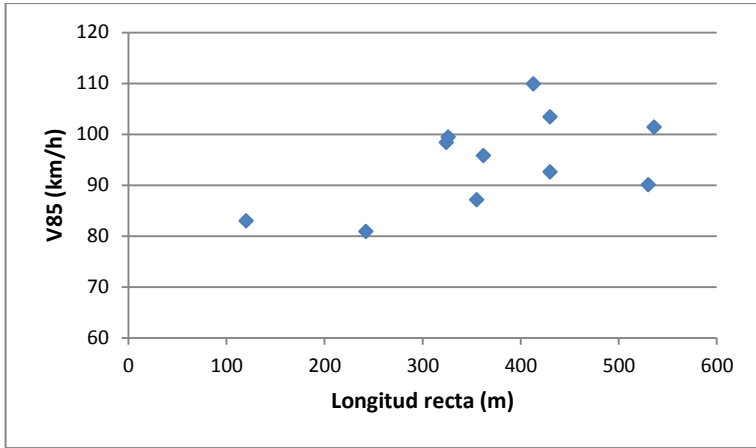


Figura 7.128 Longitud de la recta vs V_{85} en rectas de longitud menor a 700 m y radio de la curva anterior superior a 600 m

7.3.2.7. Estudio de la velocidad elegida por los conductores en secciones recta

En apartados anteriores ya se ha mencionado la importancia de abordar no sólo la influencia de la infraestructura en la velocidad sino también otros factores, como las características del conductor o del viaje que este realiza y del vehículo que conduce. Por ello, al igual que se ha realizado en el caso de las curvas, en este apartado se analiza la influencia de estos factores en la velocidad elegida por los conductores.

En este caso, las diferencias en el comportamiento en la conducción pueden tener más importancia ya que, mientras que en el caso de la velocidad en curvas las variables geométricas explican una alta variabilidad, en el caso de la velocidad desarrollada en tramos rectos la variabilidad explicada es muy baja. Además, la velocidad desarrollada en tramos rectos puede ser un buen indicador, como se ha visto en el estado del arte, de comportamientos agresivos.

Este análisis, basado en los datos procedentes de las encuestas, se ha realizado por medio de un análisis multivariable, con el fin de no confundir los efectos producidos con cada una de las variables, por la posible relación existente entre ellas.

Para la inclusión de las diferentes variables en el modelo, se han tenido en cuenta las consideraciones ya relacionadas en el apartado correspondiente en el estudio en tramos curvos.

El análisis se ha llevado a cabo con datos de 1632 conductores que, teniendo en cuenta que cada uno de ellos puede haber circulado por diferentes elementos, suponen un conjunto de 6133 vehículo·recta.

Para un análisis más detallado de esta muestra se recogen las tablas 7.50-7.57 con el número de conductores·recta utilizados para cada variable.

	Conductor-recta
Hombre (1)	4583
Mujer (0)	1456

Tabla 7.50 Muestra conductor-recta de la variable CONDUCTOR

	Conductor-recta SI (1)	Conductor-recta NO (0)
18-20 años	180	5953
21-25 años	363	5770
26-30 años	695	5438
31-35 años	797	5336
36-40 años	742	5391
41-45 años	642	5491
46-50 años	593	5540
51-55 años	408	5725
56-60 años	411	5722
61-65 años	275	5858
66-70 años	283	5850
71-75 años	135	5998
76-80 años	62	6071
81-90 años	11	6122

Tabla 7.51 Muestra conductor-recta de las variables relacionadas con la edad del conductor

	Conductor-recta SI (1)	Conductor-recta NO (0)
KM_POCOS	435	5698
KM_MEDIO	3010	3123
KM_MUCHOS	1636	4497

Tabla 7.52 Muestra conductor-recta de las variables relacionadas con la experiencia del conductor

	Conductor-recta SI (1)	Conductor-recta NO (0)
VIAJE_CORTO	2172	3961
VIAJE_MEDIO	1740	4393
VIAJE_LARGO	238	5895
VIAJE_RUTA	282	5851

Tabla 7.53 Muestra conductor-recta de las variables relacionadas con la longitud del viaje

	Conductor-recta
Habitual (1)	4328
No habitual (0)	1446

Tabla 7.54 Muestra conductor-recta de la variable HABITUAL

	Conductor-recta
Laboral (1)	3305
No laboral (0)	2118

Tabla 7.55 Muestra conductor-recta de la variable LABORAL

	Conductor-recta
NIÑOS	201
ADULTOS	1629
ANCIANOS	224

Tabla 7.56 Muestra conductor-recta de las variables relacionadas con los ocupantes

	Conductor-recta SI (1)	Conductor-recta NO (0)
VH_LIGERO	2548	3585
VH_CAMIONETA	32	6101
VH_FURGONETA	739	5394
VH_MONOVOLUMEN	153	5980
VH_TODOTERRENO	234	5899

Tabla 7.57 Muestra conductor-recta de las variables relacionadas con la longitud del viaje

Los resultados de este análisis en el que se han incluido todas las variables relacionadas con el conductor, el viaje que este realiza y el tipo de vehículo que conduce, se muestran en la tabla 7.58. El modelo resultante explica un 9.93 % de la variabilidad de la velocidad elegida por los conductores en rectas.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	82.3922	0.918036	89.7483	0.0000
CONDUCTOR	1.24998	0.49257	2.53768	0.0112
EDAD_21_25	6.08219	1.07989	5.63225	0.0000
EDAD_26_30	0.0672791	0.922634	0.0729207	0.9419
EDAD_31_35	-2.07403	0.908779	-2.28221	0.0225
EDAD_36_40	-2.77721	0.924122	-3.00524	0.0027
EDAD_41_45	-2.86944	0.939537	-3.0541	0.0023
EDAD_46_50	-3.09579	0.960101	-3.22444	0.0013
EDAD_51_55	-2.2169	1.06747	-2.07678	0.0378
EDAD_56_60	-6.49949	1.03664	-6.26976	0.0000
EDAD_61_65	-6.1008	1.16678	-5.22877	0.0000
EDAD_66_70	-6.85132	1.22456	-5.59491	0.0000
EDAD_71_75	-6.97233	1.46848	-4.74799	0.0000
EDAD_76_80	-13.1756	2.28126	-5.77557	0.0000
EDAD_81_90	-12.8213	4.58206	-2.79816	0.0051
KM_POCOS	-1.20132	0.82238	-1.46078	0.1441
KM_MUCHOS	4.97119	0.46959	10.5862	0.0000
VIAJE_CORTO	-2.33387	0.431031	-5.41463	0.0000
VIAJE_LARGO	-0.202138	1.00277	-0.201579	0.8402
VIAJE_RUTA	0.971234	0.950412	1.02191	0.3068
HABITUAL	3.71031	0.46868	7.91651	0.0000
LABORAL	-0.319768	0.471314	-0.678461	0.4975

NIÑOS	-2.76234	0.786283	-3.51317	0.0004
ADULTOS	-0.911842	0.353081	-2.58253	0.0098
ANCIANOS	-3.82131	0.882412	-4.33052	0.0000
VH_CAMIONETA	-8.24048	2.55228	-3.22867	0.0012
VH_FURGONETA	-2.91497	0.610236	-4.77678	0.0000
VH_MONOVOL	3.4513	1.2309	2.80389	0.0050
VH_TODOTERR	0.166152	1.00577	0.165199	0.8688

Tabla 7.58 Resultados del análisis del estudio de la velocidad elegida en rectas

Realizando un estudio en detalle de los resultados obtenidos para cada variable, se obtienen las conclusiones recogidas a continuación.

Género del conductor

El género del conductor tiene un efecto significativo en la velocidad elegida, siendo 1.25 km/h mayor en los hombres que en las mujeres.

Edad del conductor

La edad de los conductores no ha resultado significativa en el rango comprendido entre 26 y 30 años. Por tanto, se concluye que la velocidad elegida cuando el conductor se encuentra dentro de este grupo de edad es similar a la velocidad elegida por los conductores noveles.

La velocidad elegida por los conductores entre 21 y 25 años aumenta respecto de la elegida por los conductores noveles en 6 km/h, para volver a igualarla entre 26 y 30 años. A partir de los 31 años la velocidad disminuye alrededor de 2.5 km/h, hasta los 56 años en los que la reducción respecto a los conductores noveles pasa a ser de 6 km/h. A partir de esta edad, los conductores tienden a reducir considerablemente su velocidad en rectas.

Experiencia del conductor

La variable que caracteriza los conductores que conducen pocos kilómetros al año no ha resultado significativa, por lo que su velocidad elegida no será diferente a la elegida por los conductores que recorren un número medio de kilómetros. Sin embargo, los conductores que conducen muchos kilómetros al año eligen una velocidad en rectas alrededor de 5 km/h mayor al resto.

Longitud del viaje

Según los resultados del análisis, los conductores que conducen dentro de una ruta o que realizan un viaje largo eligen una velocidad similar a los que están realizando un recorrido de longitud media. La velocidad elegida disminuye casi 2.5 km/h cuando la longitud del viaje es corta.

Frecuencia del viaje

Cuando un trayecto es recorrido habitualmente, la velocidad elegida por el conductor es 3.7 km/h superior a cuando no lo es.

Motivo del viaje

El motivo del viaje, distinguiendo si es por motivos laborales o no, no resulta significativo a la hora de elegir la velocidad a desarrollar en rectas.

Ocupantes

En el análisis de la influencia de la presencia de pasajeros en la velocidad elegida por el conductor, se puede concluir que la presencia de pasajeros, bien sea niños, adultos o ancianos supone una disminución de la velocidad, llegando a casi 4 km/h en el caso de pasajeros ancianos.

Tipo de vehículo

Finalmente, se ha evaluado también la influencia del tipo de vehículo con el que se circula. Los resultados han mostrado una velocidad para los vehículos ligeros y todoterrenos similar y una velocidad en torno a 3.5 km/h superior para monovolúmenes. En el caso de furgonetas se produce una reducción de cerca de 3 km/h, llegando este descenso a 8 km/h en el caso de camionetas.

7.3.2.8. Estudio de la velocidad desarrollada por los conductores en secciones recta

El bajo R^2 del modelo indica que se han omitido variables explicativas clave. Unas de las variables más importantes podrían ser las características geométricas del trazado de la carretera. Sin embargo, la influencia de estas no será tan esencial en este caso como en el caso de la velocidad en curvas. No obstante, incluyendo estas variables en el modelo es posible caracterizar la velocidad desarrollada por los conductores en las alineaciones rectas.

Tras analizar la influencia de las distintas variables geométricas, las que aportan mejores resultados y, por tanto, se incorporan al modelo son la longitud de la recta y el radio de la curva anterior. El resultado de esta incorporación es el modelo que se presenta en la tabla 7.59, con un R^2 de 20.24 %.

Parámetro	Estimación	Error	Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	78.4934	0.918055	85.4997	0.0000
CONDUCTOR	1.31919	0.47833	2.75791	0.0058
EDAD_21_25	5.33742	1.04719	5.09688	0.0000
EDAD_26_30	-1.15886	0.898078	-1.29038	0.1969
EDAD_31_35	-3.25091	0.885868	-3.66974	0.0002
EDAD_36_40	-3.77194	0.901182	-4.18555	0.0000
EDAD_41_45	-3.68389	0.912949	-4.03516	0.0001
EDAD_46_50	-4.14532	0.93481	-4.4344	0.0000
EDAD_51_55	-3.42775	1.03294	-3.31845	0.0009
EDAD_56_60	-7.60107	1.00508	-7.56264	0.0000
EDAD_61_65	-7.48537	1.12891	-6.63061	0.0000
EDAD_66_70	-7.95031	1.19554	-6.64995	0.0000
EDAD_71_75	-8.59979	1.4309	-6.01006	0.0000
EDAD_76_80	-12.8108	2.26019	-5.66803	0.0000
EDAD_81_90	-15.3754	4.34741	-3.53669	0.0004
KM_POCOS	-1.14581	0.789972	-1.45044	0.1469
KM_MUCHOS	4.95682	0.459658	10.7837	0.0000
VIAJE_CORTO	-2.5964	0.421138	-6.16519	0.0000

VIAJE_LARGO	-2.19196	0.979619	-2.23756	0.0252
VIAJE_RUTA	1.02719	0.929716	1.10484	0.2692
HABITUAL	3.23602	0.455717	7.10094	0.0000
LABORAL	-0.133044	0.456881	-0.2912	0.7709
NIÑOS	-3.03699	0.785093	-3.86832	0.0001
ADULTOS	-1.08479	0.342864	-3.16393	0.0016
ANCIANOS	-3.88782	0.856289	-4.54031	0.0000
VH_CAMIONETA	-10.9315	2.63009	-4.15632	0.0000
VH_FURGONETA	-3.78192	0.596563	-6.3395	0.0000
VH_MONOVOL	2.74893	1.20552	2.28029	0.0226
VH_TODOTERR	-0.813859	0.996794	-0.816476	0.4142
LONG_RECTA	0.0111855	0.0004579	24.4278	0.0000
R_CURVA_ANTERIOR	-0.000305253	0.0000949558	-3.21468	0.0013

Tabla 7.59 Resultados del análisis inicial del estudio de la velocidad desarrollada en rectas

Los resultados muestran que, al considerar variables geométricas como la longitud de la recta y el radio de la curva anterior, las diferencias entre los conductores que realizan un viaje largo y aquellos que hacen un viaje medio pasan a ser significativas. El resto de las variables presentan un comportamiento similar al observado para la velocidad elegida.

Con este modelo, se han considerado gran cantidad de factores que pueden tener influencia en la velocidad desarrollada por los conductores en las alineaciones rectas. Sin embargo, hay factores aleatorios que no se han tenido en cuenta. Las rectas elegidas para el análisis se encuentran ubicadas en 10 tramos de carretera distintos, con características diferentes. Estas características ya se ha comprobado que tienen una gran influencia en la velocidad desarrollada por los conductores en secciones curva y su influencia puede ser mucho mayor en la velocidad desarrollada en secciones recta. Esto es debido a que variables como el entorno, la orografía, o incluso la señalización pueden influir de manera determinante en la elección de la velocidad en rectas.

Por ello, se ha introducido en el modelo una serie de variables que se corresponden con cada uno de los tramos de toma de datos. Se trata de una variable dicotómica para cada uno de los tramos, de forma que su valor será 1 si el conductor se encuentra circulando por ese tramo y 0 si no es así. El tramo considerado como referencia y que no se incluye en el modelo es el tramo 1. El modelo resultante tiene un R^2 de 34.20 %. Este valor no parece alto comparado con el obtenido en el caso de la velocidad desarrollada en curvas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que se trata de un análisis con datos desagregados y que, en la elección de la velocidad en rectas, el factor humano, en el que influyen una gran cantidad de variables difícilmente medibles, tiene un peso mucho mayor que en el caso de las curvas.

La tabla 7.60 muestra los resultados finales del estudio de la velocidad desarrollada en rectas.

Parámetro	Estimación	Error	Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	84.8238	1.18259	71.7272	0.0000
CONDUCTOR	1.62819	0.439104	3.70798	0.0002
EDAD_21_25	1.63074	1.00509	1.62248	0.1047

EDAD_26_30	-4.67639	0.868554	-5.38411	0.0000
EDAD_31_35	-6.87095	0.855147	-8.03481	0.0000
EDAD_36_40	-7.42235	0.873359	-8.49862	0.0000
EDAD_41_45	-7.55566	0.889967	-8.48982	0.0000
EDAD_46_50	-7.73889	0.898186	-8.61613	0.0000
EDAD_51_55	-7.48567	0.996176	-7.51441	0.0000
EDAD_56_60	-9.94117	0.952823	-10.4334	0.0000
EDAD_61_65	-11.6224	1.06743	-10.8882	0.0000
EDAD_66_70	-10.394	1.13178	-9.18378	0.0000
EDAD_71_75	-10.8032	1.3501	-8.00177	0.0000
EDAD_76_80	-16.3158	2.10125	-7.76481	0.0000
EDAD_81_90	-22.3943	3.99615	-5.60396	0.0000
KM_POCOS	-1.95004	0.724201	-2.69268	0.0071
KM_MUCHOS	1.3688	0.50573	2.70659	0.0068
VIAJE_CORTO	-0.647833	0.402572	-1.60924	0.1076
VIAJE_LARGO	-1.57833	0.933011	-1.69165	0.0907
VIAJE_RUTA	0.300225	0.851097	0.352751	0.7243
HABITUAL	2.83659	0.416337	6.8132	0.0000
LABORAL	0.0183486	0.41818	0.0438773	0.9650
NIÑOS	-1.82116	0.730106	-2.49437	0.0126
ADULTOS	-1.46614	0.315083	-4.65318	0.0000
ANCIANOS	-2.05155	0.78543	-2.61201	0.0090
VH_CAMIONETA	-9.70261	2.4168	-4.01465	0.0001
VH_FURGONETA	-4.25345	0.554625	-7.66907	0.0000
VH_MONOVOL	3.05512	1.09847	2.78125	0.0054
VH_TODOTERR	0.63937	0.914152	0.699414	0.4843
LONG_RECTA	0.0106967	0.000445876	23.9904	0.0000
R_CURVA_ANTERIOR	-0.0000882777	0.0000898329	-0.0982688	0.9217
TRAMO_2	-3.53087	1.00192	-3.52411	0.0004
TRAMO_3	2.9677	0.912164	3.25347	0.0011
TRAMO_4	6.81974	0.807941	8.44089	0.0000
TRAMO_5	-7.60595	0.838298	-9.07308	0.0000
TRAMO_6	-9.32635	1.11034	-8.39953	0.0000
TRAMO_7	-0.061498	0.878273	-0.0700216	0.9442
TRAMO_8	-10.8688	0.905727	-12.0001	0.0000
TRAMO_9	0.772801	1.04663	0.738368	0.4603
TRAMO_10	-9.77496	0.96965	-10.0809	0.0000

Tabla 7.60 Resultados del análisis del estudio de la velocidad desarrollada en rectas

A continuación, se detallan los resultados obtenidos tras estas consideraciones, según las diferentes categorías.

Género del conductor

El género del conductor sigue teniendo un efecto significativo en la velocidad elegida, siendo 1.62 km/h mayor en los hombres que en las mujeres. Este valor es ligeramente superior al obtenido en el estudio inicial de la velocidad elegida.

Edad del conductor

A diferencia de los casos anteriores, el rango de edad entre 21 y 25 años no ha resultado significativo y, por tanto, se puede decir que la velocidad desarrollada en rectas de los conductores con edades entre 18 y 25 años es similar. A partir de los 26 años, los conductores tienden a reducir su velocidad considerablemente.

Experiencia del conductor

En la velocidad desarrollada por los conductores en tramos rectos tiene especial influencia esta variable. Los conductores con pocos kilómetros recorridos al año tienden a circular a menor velocidad, alrededor de 2 km/h menos, mientras que los conductores con más experiencia circulan 1.36 km/h más rápido.

Longitud del viaje

Según los resultados del análisis, la longitud del viaje no es una variable significativa. Por tanto, la velocidad desarrollada en rectas no dependerá de ella.

Frecuencia del viaje

Cuando un trayecto es recorrido habitualmente la velocidad elegida por el conductor es 2.8 km/h superior a cuando no lo es.

Motivo del viaje

El motivo del viaje, distinguiendo si es por motivos laborales o no, no resulta significativo a la hora de elegir la velocidad a desarrollar en curvas.

Ocupantes

En el análisis de la influencia de la presencia de pasajeros en la velocidad desarrollada por el conductor, se muestra que la presencia de estos produce una reducción de velocidad entre 1.5 y 2 km/h.

Tipo de vehículo

Se ha evaluado también la influencia del tipo de vehículo con el que se circula. Los resultados han mostrado una velocidad para los todoterrenos similar a la de los vehículos ligeros y 3 km/h superior para monovolúmenes.

Este aumento de velocidad para vehículos monovolúmenes puede ser debido, como ya se mencionó en el estudio de la velocidad desarrollada en curvas, a que se trate de vehículos con unas altas prestaciones.

Por otra parte, el hecho de conducir una camioneta (camión con MMA inferior a 3500 kg) supone una reducción de la velocidad superior a 9 km/h, siendo esta reducción de 4 km/h para furgonetas.

7.3.3. Análisis de los diferenciales de velocidad en las transiciones recta-curva

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en el análisis de la seguridad vial de un tramo de carretera es el cambio de velocidad que se produce en las transiciones recta-curva.

Con el fin de poder caracterizar el comportamiento de los conductores en estas transiciones se van a desarrollar en este apartado varios modelos con los que poder estimar el diferencial de velocidades y la tasa de deceleración en función de las características geométricas de la vía.

Asimismo, se va a analizar la influencia de las características del conductor, del viaje que realiza y del vehículo que conduce en las tasas de deceleración elegidas. Este aspecto es especialmente importante ya que, como se ha visto en el estado del arte, estudios anteriores han mostrado cómo el comportamiento de los conductores en la deceleración está altamente relacionado con su historial de accidentes. Por tanto, los resultados del estudio de los estilos de conducción en función de la deceleración desarrollada pueden convertirse en una herramienta esencial como base para el desarrollo de políticas y campañas de concienciación para la mejora de la seguridad vial.

La mayor parte de las investigaciones se han basado en datos de velocidad puntual medidos en la recta anterior y en los puntos inicial y medio de la curva, asumiendo en muchos casos que la deceleración se produce únicamente en el tramo recto.

Para este trabajo de investigación se dispone, gracias a la nueva metodología de toma de datos, de perfiles continuos de velocidad en tramos recta-curva de diferentes características. La utilización de perfiles continuos de velocidad obtenidos empíricamente ha permitido localizar los puntos inicial y final de la deceleración que se produce en las transiciones en cada perfil individual, así como también determinar las velocidades asociadas.

7.3.3.1. Secciones recta-curva a estudiar

Tras el estudio detallado de cada uno de los tramos presentados, se eligieron, para el estudio de la deceleración y del estudio del diferencial de velocidades, 37 transiciones recta-curva. Esta elección está basada en la necesidad de que en una transición recta-curva, la deceleración se produzca debido a la aparición de la curva correspondiente y no de una posible curva situada a continuación. Esta situación, que también puede darse en el caso de recta-curva-recta-curva cuando la segunda recta es de corta longitud, provocaría resultados que no permitirían estudiar el fenómeno de forma aislada.

En la tabla 7.61 se muestran las transiciones recta-curva elegidas para el estudio y posterior modelización y caracterización de la deceleración y de los diferenciales de velocidad, definidas por los Pk inicial y final tanto de la recta como de la curva, incluyendo la curva circular y las curvas de transición asociadas.

Transición	Pk inicio curva	Pk final curva	Pk inicio recta	Pk final recta	Radio (m) curva anterior	Longitud (m) recta
DEC0111	2862	3049	1314	2862	102	1548
DEC0112	5179	5354	4926	5179	158	253
DEC0113	5558	5765	5354	5558	100	204
DEC0114	6326	6459	6067	6326	52	259
DEC0115	9292	9511	9013	9292	142	279
DEC01V6	4926	4669	5179	4926	275	253
DEC01V7	6067	5891	6326	6067	76	259

DEC0211	850	1005	217	850	328	633
DEC0212	2450	2627	1975	2450	324	475
DEC0311	2658	2837	2332	2658	297	326
DEC0312	3272	3515	2837	3272	256	435
DEC03V1	2837	2658	3272	2837	297	435
DEC03V2	3515	3272	3542	3515	256	27
DEC0413	3186	3519	2773	3186	443	413
DEC04V1	2050	1767	2480	2050	242	430
DEC0511	628	749	361	628	97	267
DEC0512	1226	1350	1212	1226	87	14
DEC0514	3432	3554	3085	3432	194	347
DEC05V1	749	628	1104	749	97	355
DEC06V3	2700	2545	3005	2700	327	305
DEC06V4	3184	3005	4028	3184	519	844
DEC0712	4810	4948	3380	4810	409	1430
DEC07V1	1813	1610	2827	1813	236	1014
DEC0812	2577	2673	2429	2577	105	148
DEC08V1	254	161	684	254	83	430
DEC08V2	2673	2577	3628	2673	105	955
DEC08V4	5170	5068	5412	5170	138	242
DEC0913	2559	2673	2553	2559	125	6
DEC0918	5961	6088	5838	5961	151	123
DEC09V1	796	577	1683	796	484	887
DEC1011	530	669	0	530	260	530
DEC1012	1102	1276	669	1102	208	433
DEC1013	2341	2530	1276	2341	189	1065
DEC1014	3046	3182	2530	3046	149	516
DEC10V1	669	530	1102	669	260	433
DEC10V2	1276	1102	2341	1276	208	1065
DEC10V3	2530	2341	3046	2530	189	516

Tabla 7.61 Transiciones recta-curva utilizadas en el estudio

El rango de pendientes en el que se encuentran estos tramos varía entre +5 % y -6 %, abarcando así un ámbito mayor que en la mayoría de las investigaciones en las que el estudio se suele reducir a pendientes de ± 4 %.

En cuanto a sus características geométricas, en la tabla 7.62 se presentan los intervalos entre los que varían las más representativas. En el anexo XI se muestra el resto de características geométricas de las transiciones recta-curva evaluadas.

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
Longitud de la recta (m)	6	1548	490.64	371.57
Radio de la curva (m)	52	519	215.35	118.77
Longitud de la curva (m)	93	333	170.16	54.73
Ángulo de deflexión (gon)	11.41	122.64	38.77	25.81

Tabla 7.62 Rangos de las principales características geométricas de las transiciones recta-curva

Tras observar estos datos, puede sorprender que se haya elegido una transición en la que la longitud de la recta sea 6 metros. Sin embargo, con el estudio del estado de alineaciones y del perfil de velocidad asociado al tramo correspondiente, se puede constatar que la curva anterior a la recta tiene un radio suficientemente amplio para que se desarrolle una velocidad similar a la que correspondería a una recta, por lo que efectivamente se produce una transición recta-curva.

Después de estudiar la muestra utilizada para el estudio de los decrementos de velocidad en las transiciones recta-curva y el estudio de la deceleración en investigaciones anteriores (tabla 7.63), se considera que esta muestra de 37 es suficiente para el rango de estudio.

	Muestra
Lamm et al. (1988)	6
McFadden y Elefteriadou (2000)	21
Misaghi y Hassan (2005)	35
Perco y Robba (2006)	10
Bella (2007)	16
Nie y Hassan (2007)	6
Figueroa y Tarko (2007)	9
Park et al. (2010)	18
Castro et al. (2011)	22

Tabla 7.63 Tamaños de muestra utilizados para el estudio de las variaciones de velocidad en las transiciones recta-curva

7.3.3.2. Variables consideradas en el estudio de las variaciones de velocidad en las transiciones recta-curva

En el presente apartado se hace una relación de las variables consideradas en el estudio de la transición recta-curva. Para ello, como se ha realizado en el caso de las curvas y las rectas, las variables se dividen en dos tipologías: las propias del trazado, obtenidas tras la restitución de la geometría de los diferentes tramos, y las

variables relacionadas con el conductor, el vehículo y el viaje, cuyos valores se han obtenido de las encuestas.

Variables relacionadas con la geometría del trazado

Las variables geométricas y las combinaciones de estas utilizadas en el análisis de las variaciones de velocidad en las transiciones recta-curva, se clasifican como:

- Recta:
 - Longitud de la recta (m): L_R
 - Pendiente (tanto por uno)
- Curva:
 - Sentido de giro de la curva: horario/antihorario
 - Pendiente (tanto por uno)
 - Longitud de la curva (m): L_{C1}
 - Ángulo de deflexión (gon): γ_1
 - Tasa de cambio de curvatura de la curva, incluyendo a la curva circular y las curvas de transición (gon/km): CCR_C
 - Curva circular:
 - Radio (m): R
 - Curvatura: la inversa del radio (m^{-1})
 - Longitud de la curva circular (m): L_{CC}
 - Clotoide anterior:
 - Longitud de la clotoide (m): L_{CL1}
 - Parámetro de la clotoide (m): A_1
 - Clotoide posterior:
 - Longitud de la clotoide (m): L_{CL2}
 - Parámetro de la clotoide (m): A_2
- Tramo (el cálculo de las tasas es similar al explicado en el caso de curvas):
 - Tasa de cambio de curvatura del tramo en el que se encuentra (gon/km), según la tramificación mostrada en el anexo V: CCR
 - Tasa de cambio de curvatura considerando la recta y la curva (gon/km): CCR_{R_C}
 - Tasa de cambio de curvatura de los 100 metros anteriores al inicio de la curva (gon/km): $CCR_{100inicio}$
 - Tasa de cambio de curvatura de los 200 metros anteriores al inicio de la curva (gon/km): $CCR_{200inicio}$
 - Tasa de cambio de curvatura de un tramo de 100 metros centrado en el punto medio de la curva (gon/km): $CCR_{100ctro}$

Se ha llevado a cabo un estudio de la correlación existente entre las diferentes variables citadas. La matriz resultante completa se encuentra en el anexo XI.

Las conclusiones del análisis son muy similares a las obtenidas al analizar las variables geométricas con posible influencia en la velocidad de operación en curvas y en rectas. Como en estos casos, se han obtenido altas correlaciones entre las diferentes características geométricas de la curva. Asimismo, se han detectado correlaciones entre las diferentes tasas de cambio de curvatura y el ángulo de deflexión de la curva.

Variables relacionadas con el conductor, el vehículo y el viaje

De los datos procedentes de las encuestas realizadas a los conductores durante las jornadas de toma de datos, se van a utilizar las mismas variables que las utilizadas en el estudio de la velocidad en curvas y en rectas:

- Conductor:
 - Sexo del conductor: hombre/mujer
 - Edad del conductor (años)
 - Kilómetros conducidos al año: pocos/medio/muchos
- Viaje:
 - Longitud del viaje: largo/medio/corto/ruta
 - Frecuencia del viaje: habitual/no habitual
 - Propósito del viaje: laboral/no laboral
- Ocupantes:
 - Número de niños
 - Número de adultos
 - Número de ancianos
- Vehículo:
 - Tipo de vehículo: turismo/todoterreno/monovolumen/furgoneta

Únicamente se muestra una relación de las diferentes variables ya que su descripción se ha realizado en el apartado de tratamiento de datos.

7.3.3.3. Modelización de los diferenciales de velocidad en las transiciones recta-curva

Uno de los métodos más utilizados en la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de carreteras se basa en el cálculo de la velocidad de operación tanto en la sección recta como en la curva, para posteriormente hallar la diferencia entre esos valores. Sin embargo, como se ha comprobado en la presente investigación y como resaltaban en sus estudios Hirsh (1987) y McFadden y Eleferiadou (2000), la distribución de velocidades en la curva y en la recta son diferentes. Por tanto, no se debería caracterizar los diferenciales de velocidad en las transiciones recta-curva como la simple diferencia de los valores del perfil de velocidad de operación en la recta y en la curva. Además, aunque las distribuciones de la velocidad fueran las mismas, el conductor correspondiente al comportamiento del percentil 85 puede no ser el mismo en las dos alineaciones.

Por otra parte, la mayoría de las investigaciones basan estos cálculos en datos obtenidos en dos secciones puntuales que no tienen por qué corresponderse con los puntos de inicio y final de la deceleración.

Gracias a los perfiles continuos de velocidad obtenidos mediante la metodología presentada, ha sido posible determinar tanto los puntos de inicio y final de la deceleración, como las velocidades asociadas a los mismos, determinando así los decrementos de velocidad individuales y los correspondientes al percentil 85. De esta forma se ha calculado el diferencial de velocidad de operación (ΔV_{85}), que es la variable generalmente utilizada en el resto de estudios, y el percentil 85 del

diferencial de velocidad ($\Delta_{85}V$), definido como el diferencial de velocidad que no ha sido excedido por el 85 % de los conductores circulando en condiciones de flujo libre. Para el cálculo de este estadístico ha sido necesario calcular para cada conductor el decremento de velocidad.

ΔV_{85} vs $\Delta_{85}V$

A partir de los datos obtenidos según se ha descrito en el párrafo anterior, se ha llevado a cabo un análisis de comparación de medias y desviación típicas, con el fin de comprobar si estos dos parámetros pueden considerarse estadísticamente iguales o no. Los resultados se muestran en la tabla 64.

Prueba de Hipótesis para $\Delta V_{85} - \Delta_{85}V$	
Media Muestral	-3.93836
Mediana Muestral	-3.91084
Desviación Típica de la Muestra	2.29114

	Hipótesis Nula	Alternativa	Estadístico	Valor-P
Prueba t	media = 0	no igual	t = -10.456	1.86251E-12
Prueba chi-Cuadrada	sigma = 1.0	no igual	Chi-cuadrado calculado = 188.976	0

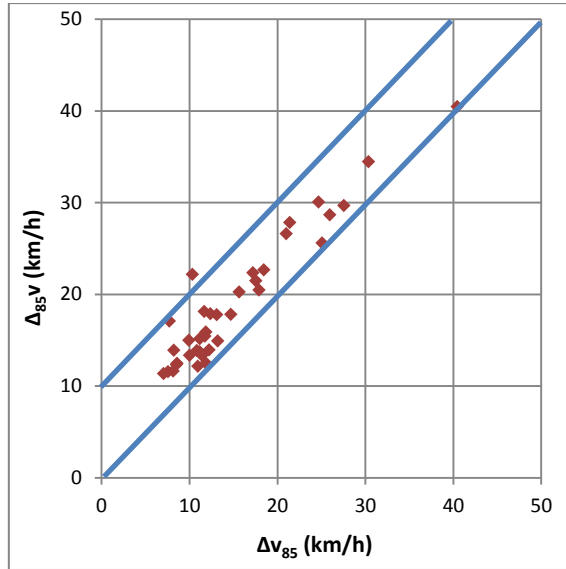
Tabla 7.64 Resultado del análisis de la comparación de ΔV_{85} y $\Delta_{85}V$

La prueba t evalúa la hipótesis de que la media de $\Delta V_{85} - \Delta_{85}V$ es igual a cero versus la hipótesis alternativa de que la media es no igual a cero. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95 % de confianza.

Por otra parte, la prueba chi-cuadrado evalúa la hipótesis nula de que la desviación típica de $\Delta V_{85} - \Delta_{85}V$ es igual a uno versus la hipótesis alternativa de que la desviación típica es no igual a uno. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95 % de confianza.

Por tanto, se puede asumir que estos dos parámetros son estadísticamente distintos.

Del mismo modo, la figura 7.129 muestra la relación entre ΔV_{85} y $\Delta_{85}V$, en la que puede observarse cómo $\Delta_{85}V$ es sistemáticamente superior a ΔV_{85} . En la figura se ha dibujado la línea $\Delta V_{85} = \Delta_{85}V$ y la línea $\Delta_{85}V = \Delta V_{85} + 10$, y como puede observarse la mayor parte de los datos se encuentran entre estas dos líneas.

Figura 7.129 ΔV_{85} vs $\Delta_{85}V$

Por tanto, según las observaciones de este análisis, puede concluirse que la simple diferencia entre las velocidades de operación subestima los valores reales de los diferenciales de velocidad. Esta conclusión es similar a las obtenidas por Misaghi y Hassan (2005).

Para completar el estudio, se ha modelizado la relación entre estos dos parámetros resultando el modelo definido por la ecuación 87, con un coeficiente R^2 de 90.66 %.

$$\Delta_{85}V = 5.30719 + 0.909241 \cdot \Delta V_{85} \quad (87)$$

La representación de este modelo se muestra en la figura 7.130.

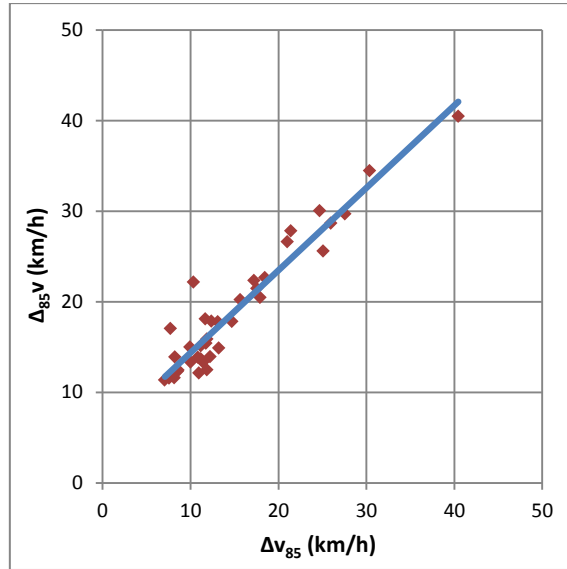


Figura 7.130 Modelo ΔV_{85} vs $\Delta_{85}V$

Al modelizar la relación entre las dos variables sin considerar la constante de la ecuación, el resultado es, con un R^2 de 97.54 %, la ecuación 88.

$$\Delta_{85}V = 1.19291 \cdot \Delta V_{85} \quad (88)$$

Por tanto, se puede concluir que el percentil 85 de los decrementos de velocidad individual en las transiciones recta-curva es un 20 % mayor que los correspondientes decrementos de la velocidad de operación.

Modelización de $\Delta_{85}V$

Teniendo en cuenta el análisis anterior, en las evaluaciones de consistencia basadas en el decremento de velocidad entre una alineación recta y la alineación curva posterior, se debería utilizar el estadístico $\Delta_{85}V$ en lugar de ΔV_{85} , como suele realizarse hasta ahora.

Con el fin de facilitar esta evaluación mediante la estimación de este estadístico, se propone el modelo basado en el radio de la curva definido mediante la ecuación 89. Con él se explica el 63.8 % de la variabilidad de la variable dependiente.

$$\Delta_{85}V = 9.051 + \frac{1527.328}{R} \quad (89)$$

Como puede observarse en la figura 7.131, el percentil 85 de la reducción de velocidad en las transiciones recta-curva se comporta asintóticamente, siendo mayor para curvas con un radio menor.

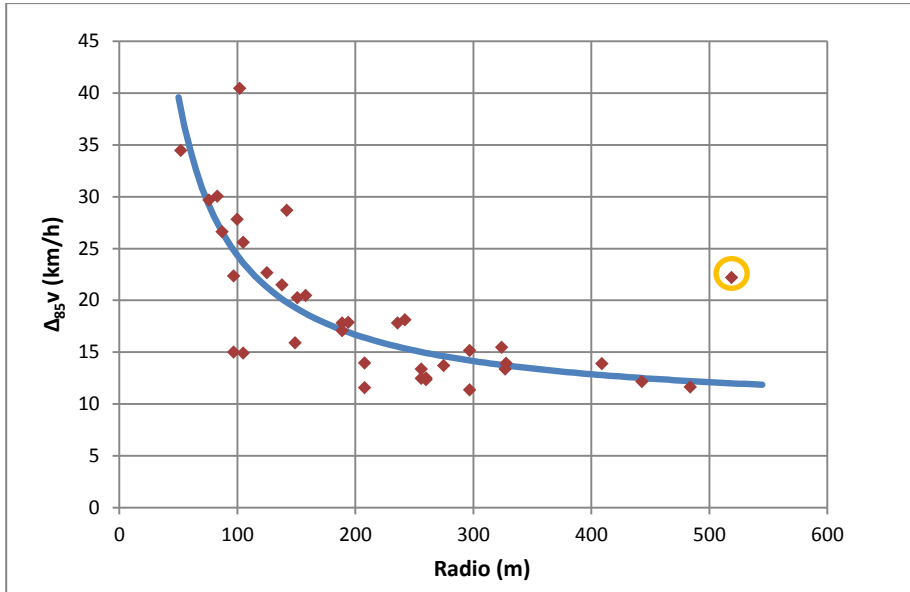


Figura 7.131 Modelos de regresión lineal para la estimación de la $\Delta_{85}V$

En la figura se observa cómo la transición recta-curva correspondiente a la curva de radio 519 metros muestra una reducción de velocidad superior a lo que le correspondería si siguiera la tendencia del resto de los datos. Esta diferencia se debe a que la curva se encuentra en una zona con urbanización a ambos lados de la carretera. Se trata de la misma zona que ha producido datos anómalos en los análisis de la velocidad en curvas y en rectas. Por ello, para la calibración de este modelo no se ha considerado este dato.

7.3.3.4. Estudio de la deceleración

El estudio de la deceleración incluye no sólo el desarrollo de un modelo que permita la estimación de las tasas de deceleración a partir de las características geométricas del trazado de la carretera, sino también la evaluación de la longitud de deceleración.

Modelización de la tasa de deceleración

El desarrollo de un modelo que estime la tasa de deceleración trata de completar el modelo de perfil de velocidad de operación, reflejando de la forma más aproximada posible el comportamiento de los conductores en la transición recta-curva. La mayor parte de las investigaciones abordan este problema utilizando tasas de deceleración obtenidas mediante la ecuación 81.

$$d = \frac{V_{85(i)}^2 - V_{85(i+1)}^2}{2D} \quad (90)$$

Donde:

d : tasa de deceleración

$V_{85(i)}$: velocidad de operación (i)

$V_{85(i+1)}$: velocidad de operación ($i + 1$)

D : distancia entre las localizaciones (i) y ($i + 1$)

Sin embargo, de acuerdo con Bella (2008) la tasa de deceleración calculada con base en el comportamiento individual de los conductores es significativamente mayor que la obtenida a partir de los perfiles de velocidad de operación. Por tanto, la metodología para la determinación de la tasa de deceleración basada en los perfiles de velocidad de operación conlleva una subestimación de la tasa experimentada realmente por los conductores.

Además, hay que tener en cuenta que la velocidad en las zonas de transición se corresponde con la envolvente de las velocidades y no con una velocidad real. Por tanto, la evaluación de la consistencia a partir de las deceleraciones calculadas con los datos del perfil de la velocidad 85, no se considera adecuadamente el comportamiento de los conductores.

Por todo ello, para la construcción de un modelo de perfil de velocidad de operación cuyo fin sea la evaluación de la consistencia, debe emplearse una metodología para el cálculo de la tasa que se aproxime lo máximo posible al comportamiento de los conductores.

En la presente investigación, para la calibración del modelo de la tasa de deceleración se utilizarán los datos de los percentiles 85 de las tasas de deceleración individuales correspondientes a cada una de las transiciones recta-curva relacionadas anteriormente.

La deceleración individual de los conductores expresada en función de las velocidades en el inicio y final de la deceleración y de la longitud de la misma, se obtiene según la ecuación 91.

$$d_i = \frac{V_{ideci}^2 - V_{fdec_i}^2}{2D_i} \quad (91)$$

Donde:

d_i : deceleración del individuo i

V_{ideci} : velocidad del individuo i en el inicio de la deceleración, generalmente correspondiente a la velocidad en la recta

V_{fdec_i} : velocidad del individuo i al final de la deceleración, generalmente correspondiente a la velocidad en la curva

D_i : distancia empleada en la deceleración por el individuo i

A partir del conjunto de deceleraciones individuales obtenidas para cada una de las transiciones a estudiar, se obtiene el correspondiente percentil 85 de la

deceleración, como la deceleración que no es superada por el 85 % de los individuos.

Influencia de las variables relacionadas con la geometría del trazado

Antes de proceder a la modelización de la tasa de deceleración es necesario llevar a cabo un estudio en profundidad de los datos disponibles y de la relación entre la variable a modelizar y las variables geométricas.

Con los datos de la muestra se ha llevado a cabo un estudio de correlación entre la tasa de deceleración calculada en las transiciones recta-curva y las variables geométricas correspondientes a cada uno de los tramos. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 7.65, donde aparecen únicamente las variables que presentan una correlación con la tasa de deceleración diferente de cero con un nivel de confianza del 95 %.

	correlación	tamaño muestra	Valor-p
CCR_c	0.7830	37	0.0000
$CCR_{100\text{ctro}}$	0.7368	37	0.0000
$CCR_{200\text{inicio}}$	0.6380	37	0.0000
$CCR_{100\text{inicio}}$	0.6266	37	0.0000
γ_1	0.6186	37	0.0000
CCR_{R_c}	0.5583	37	0.0003
CCR	0.4051	37	0.0129
L_{C1}	-0.4718	37	0.0032
L_{CL2}	-0.5320	37	0.0007
L_{CL1}	-0.5982	37	0.0001
R	-0.7767	37	0.0000
A_2	-0.7855	37	0.0000
A_1	-0.8216	37	0.0000

Tabla 7.65 Resultados del análisis de correlación de la tasa de deceleración

Como puede comprobarse, las variables que mayor correlación positiva muestran son las tasas de cambio de curvatura, siendo la tasa de cambio de curvatura de la curva la que mayor correlación presenta. Una correlación similar, aunque inferior, tiene la tasa de cambio de curvatura del tramo de 100 metros cuyo centro coincide con el centro de la curva. Probablemente, esta similitud de correlaciones se deba a que los valores de ambas tasas sean muy parecidos. Por tanto, y teniendo en cuenta que la correlación del resto de las tasas es muy inferior, únicamente se va a considerar en el estudio la tasa de cambio de curvatura de la curva.

Por otra parte, en cuanto a correlaciones negativas las variables que destacan son los parámetros de las clotoides adyacentes a la curva y el radio de esta. Han resultado significativas y con valor similar las correlaciones de los parámetros de las

dos clotoides. Sin embargo, únicamente se va a considerar en el estudio el parámetro de la clotoide que se encuentra entre la recta y la curva, ya que es muy probable que el parámetro de la otra clotoide presente correlación simplemente porque en la mayoría de los casos las clotoides son simétricas o casi simétricas.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, el estudio de la tasa de deceleración se va a basar en las variables: tasa de cambio de curvatura de la curva (CCR_C), el radio de esta (R) y el parámetro de la clotoide que se encuentra entre la recta y la curva (A_1).

La representación de la relación entre la primera de ellas y la tasa de deceleración se muestra en la figura 7.132. En ella se aprecia cómo al aumentar la tasa de cambio de curvatura, la deceleración aumenta considerablemente. Este aumento es especialmente acusado para valores de CCR_C inferiores a, aproximadamente, 400 gon/km. A partir de este valor, la tasa de deceleración permanece prácticamente constante.

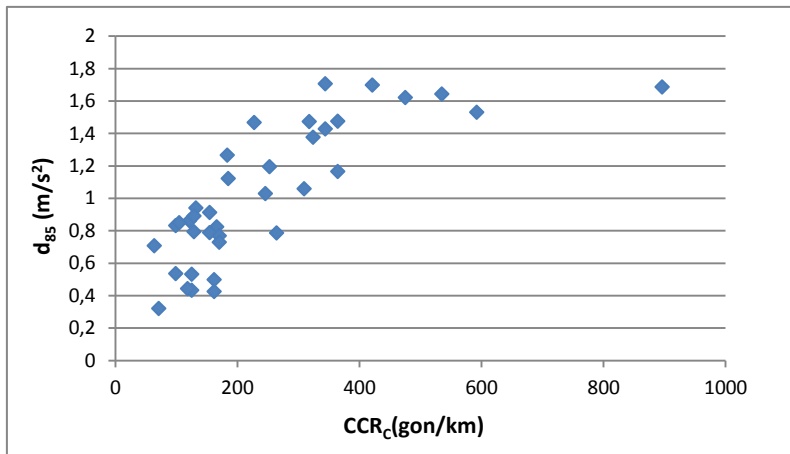


Figura 7.132 CCR_C vs d_{85}

La tendencia es opuesta cuando se estudia la relación entre la tasa de deceleración y variables como el parámetro de la clotoide o el radio de la curva. En la figura 7.133 se observa la disminución que se produce en la deceleración al aumentar el parámetro de la clotoide. La tendencia de disminución es más clara para valores pequeños del parámetro, mientras que a partir de cierto valor la deceleración se mantiene, como ocurría en el caso de la tasa de cambio de curvatura, prácticamente constante.

El comportamiento de la deceleración respecto del parámetro de la clotoide es similar a su comportamiento respecto del radio de la curva circular. Sin embargo, en este último caso la disminución de la tasa de deceleración es más suave (ver figura 7.134).

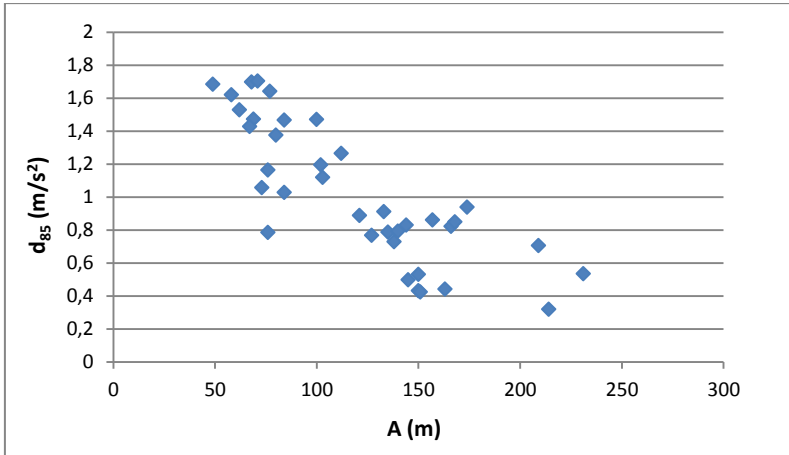


Figura 7.133 Parámetro A vs d_{85}

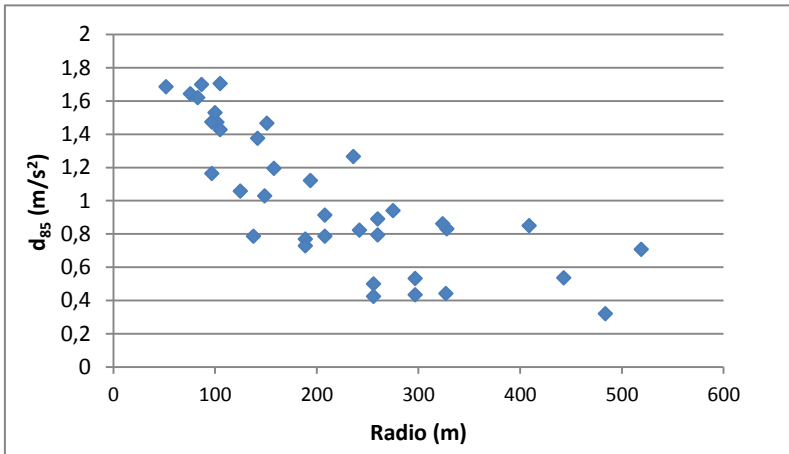


Figura 7.134 Radio vs d_{85}

En ninguno de los casos se ha observado ningún dato anómalo que presente un comportamiento fuera del esperado. Por tanto, a pesar de que en el caso de los decrementos de velocidad uno de los datos ha sido eliminado del análisis, se mantendrá la muestra completa para la modelización. No obstante, durante la modelización se prestará especial atención a la posible influencia del dato considerado anómalo en el estudio de los diferenciales de velocidad.

Modelización de la tasa de deceleración

Tras el análisis de la influencia de las distintas variables en la tasa de deceleración, en este subapartado se presenta el desarrollo y calibración de los diferentes modelos que hagan factible su estimación a partir de la geometría del trazado de la carretera.

Del análisis se ha concluido que las variables con mayor correlación con la tasa de deceleración son la tasa de cambio de curvatura de la curva, el radio de la misma y el parámetro de la clotoide de transición entre la recta y la curva. Por tanto, serán estas tres variables en las que se base la calibración del modelo.

Inicialmente se han evaluado los diferentes modelos basados en regresión lineal simple calibrados a partir de los datos de la muestra, tomando como variables independientes las descritas anteriormente. Los modelos que mejores resultados han presentado para explicar la variabilidad de la tasa de deceleración son los que se presentan en la tabla 7.66.

Modelo	Expresión	R ²	R ² ajustado
DEC1	$d_{85} = 0.446989 + 90.4721/R$	68.41%	67.51%
DEC2	$d_{85} = 0.173536 + 86.4012/A$	70.83%	69.99%
DEC3	$d_{85} = 0.552754 + 0.00190261 \cdot CCR_C$	61.30%	60.19%
DEC4	$d_{85} = \sqrt{-0.0652071 + 201.174/R}$	73.40%	72.63%
DEC5	$d_{85} = \sqrt{-0.631462 + 187.862/A}$	72.66%	71.88%
DEC6	$d_{85} = \sqrt{-1.15034 + 0.158027 \cdot \sqrt{CCR_C}}$	73.26%	72.50%

Tabla 7.66 Modelos de regresión lineal simple para la estimación de la d_{85}

Los tres primeros se han obtenido mediante regresión lineal simple, directa en el caso de la tasa de cambio de curvatura e inversa en el caso del radio y del parámetro de la clotoide. Los tres modelos, como muestra la figura 7.135, aproximan adecuadamente el comportamiento de la deceleración en la transición recta-curva, especialmente en los casos en los que las variables explicativas son el radio y el parámetro de la clotoide.

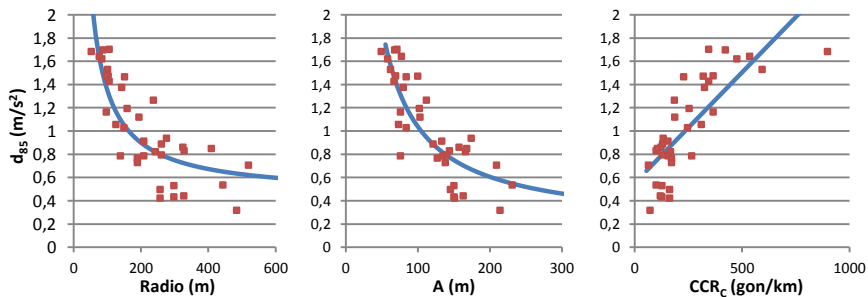


Figura 7.135 Modelos de regresión lineal para la estimación de la d_{85} : DEC1, DEC2 y DEC3

Sin embargo, la variabilidad explicada por los modelos puede aumentarse mediante diferentes transformadas de las variables que constituyen los modelos. Así, en el caso de los modelos DEC4 y DEC5 se ha recurrido a la función cuadrática de la variable dependiente, mientras que en el DEC6 esta función cuadrática se ha completado con la raíz cuadrada de la variable independiente. La representación de los modelos resultantes se muestra en la figura 7.136. En ella, se observa una

mejora en el ajuste de los datos en el caso del radio y la tasa de cambio de curvatura de la curva, como variables explicativas, adaptándose adecuadamente al comportamiento de la deceleración en el rango de datos de la muestra. Sin embargo, cuando la variable explicativa es el parámetro de la clotoide, a pesar de que el R^2 es considerablemente alto, la forma del modelo no se adapta adecuadamente al comportamiento de la deceleración, por lo que será desechado.

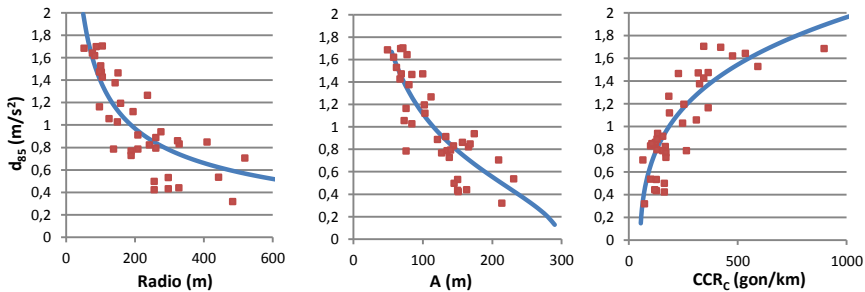


Figura 7.136 Modelos de regresión lineal para la estimación de la d_{85} : DEC4, DEC5 y DEC6

Evaluación de la longitud de deceleración

En el estudio del fenómeno de la deceleración no sólo es importante considerar las tasas de deceleración, sino también la longitud de la misma y su localización. Gracias a los perfiles continuos de velocidad individuales, obtenidos con la nueva metodología de toma de datos, es posible determinar la longitud y localización de la deceleración para cada uno de los vehículos. Del análisis individualizado de estas deceleraciones se ha realizado una clasificación de los diferentes tipos de deceleración dependiendo de la localización del inicio y final de la misma. En la tabla 7.67 se muestra la tipología considerada y el porcentaje de aparición en la muestra analizada.

Tipo deceleración	R1	CL1	CC	CL2	%
1 – Comienzo antes de la curva y fin en la primera clotoide	■	■	□	□	37.55%
2 – Comienzo antes de la curva y fin en la curva circular	■	■	■	□	24.68%
3 – Comienzo antes de la curva y fin en la segunda clotoide	■	■	■	■	15.00%
4 – Comienzo y fin en la recta anterior a la curva	■	□	□	□	8.35%
5 – Comienzo en la primera clotoide y fin en la segunda clotoide	□	■	■	■	4.55%
6 – Comienzo en la primera clotoide y fin en la curva circular	□	■	■	□	4.47%
7 – Comienzo y fin en la primera clotoide	□	■	□	□	2.78%

Donde:

- R1: recta anterior a la curva
- CL1: primera clotoide
- CC: curva circular
- CL2: segunda clotoide

Tabla 7.67 Tipos de deceleración y porcentaje de aparición en la muestra considerada

El porcentaje de aparición de los tipos de deceleración no presentados en la tabla 7.46 es inferior al 1 %.

En la mayoría de los casos, la deceleración se desarrolla tanto en la recta como en el tramo curvo, por lo que la hipótesis utilizada por la mayoría de modelos de que la deceleración se produce únicamente en el tramo recto no se ajusta al comportamiento de los conductores, ya que sólo se da en el 8.35 % de los casos. De hecho, el comportamiento mayoritario de los conductores consiste en el inicio de la deceleración en la recta y su finalización en el interior de la curva (77.23 % de los casos), y únicamente en un 1.12 % de los casos la deceleración comienza después de la primera clotoide.

Con el fin de completar el estudio se ha evaluado la posibilidad de modelizar la longitud de la deceleración en función de las características geométricas de la carretera, así como también el porcentaje de deceleración en el tramo recto y en el tramo curvo. Sin embargo, los resultados no han sido concluyentes, por lo que es posible que estas variables dependan más de características motivacionales del conductor que del diseño geométrico de la transición recta-curva.

No obstante, el estudio de las deceleraciones individuales muestra que el porcentaje medio de longitud de deceleración que tiene lugar en la recta es 45.7 %, 42.7 % en la primera clotoide, 7.4 % en la curva circular, 3.3 en la segunda clotoide y 0.7 % en la recta posterior a la curva. Además, considerando únicamente las deceleraciones individuales que comienzan en la recta anterior a la curva o en la primera clotoide, el último porcentaje disminuye considerablemente.

Un estudio similar se ha llevado a cabo para los vehículos cuya deceleración se corresponde con el percentil 85 de la deceleración, para cada una de las transiciones recta-curva analizadas. En este caso, el porcentaje medio de la longitud de deceleración que tiene lugar en la recta es 44.8 %, 48.3 % en la primera clotoide, 4.3 % en la curva circular, 2.5 % en la segunda clotoide y 0 % en la recta posterior a la curva.

Para un análisis gráfico del comportamiento de la deceleración, se han representado los perfiles individuales de los conductores correspondientes al percentil 85 de la deceleración para cada una de las transiciones recta-curva, desde 200 metros antes del inicio de la curva. En la figura 7.137 se muestran los perfiles correspondientes a las transiciones recta-curva en las que el radio de la curva es inferior a 200 metros y en la figura 7.138 los correspondientes a las curvas con radio superior a 200 metros.

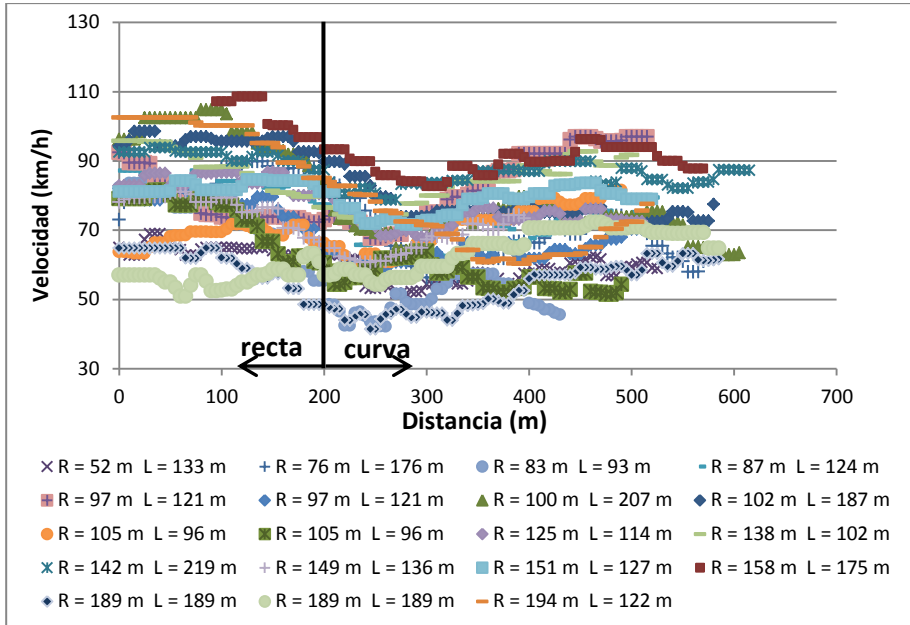


Figura 7.137 Perfiles de velocidad de los conductores correspondientes al percentil 85 de la tasa de deceleración, para curvas con radio inferior a 200 metros

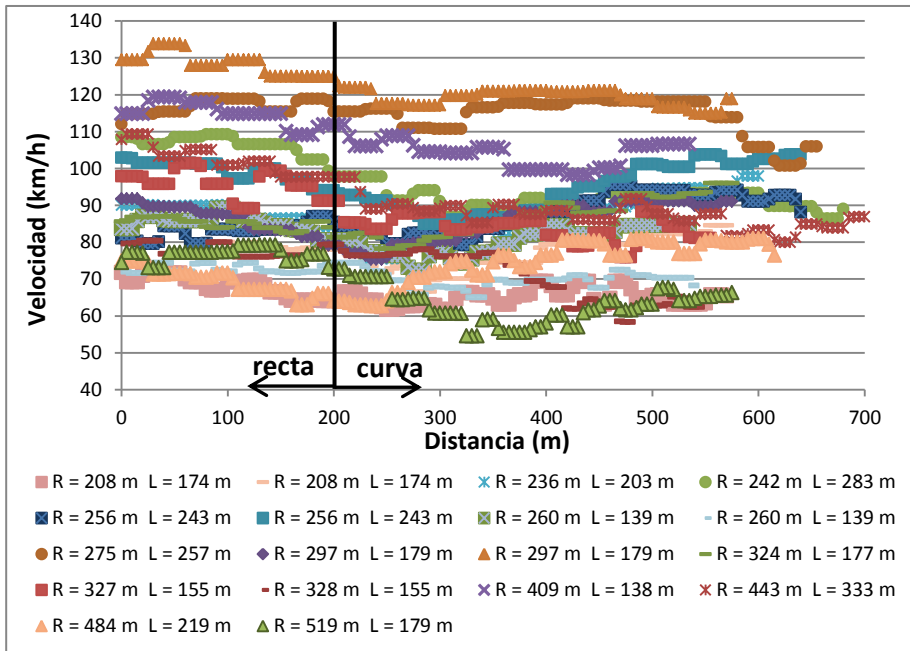


Figura 7.138 Perfiles de velocidad de los conductores correspondientes al percentil 85 de la tasa de deceleración, para curvas con radio superior a 200 metros

Como puede comprobarse, en las curvas con radio inferior a 200 metros, la velocidad mínima en la curva se mantiene en una sección reducida, mientras que en los perfiles de velocidad para curvas con radio superior a 200 metros las velocidades son más altas y las transiciones son más suaves, como se esperaba. En este caso la velocidad mínima se mantiene en la curva durante una longitud mayor.

De acuerdo con estos resultados, para la construcción de los perfiles continuos de velocidad se puede asumir que la deceleración comienza en el tramo recto y finaliza en la primera clotoide, manteniendo la velocidad en la curva circular constante. En el caso de no disponer de clotoide, es recomendable situar el 50 % de la deceleración en el tramo recto y el 50 % restante en el tramo circular.

7.3.3.5. Estudio de la tasa de deceleración elegida por los conductores

En el estado del arte se ha destacado cómo estudios anteriores han mostrado que el comportamiento de los conductores en la deceleración está altamente relacionado con su historial de accidentes. En algunos casos se ha sugerido que esta relación es incluso más importante que la relación con la velocidad desarrollada en rectas.

Esta afirmación no implica que los conductores con tasas de deceleración mayores vayan a tener un accidente, sino que este comportamiento puede considerarse agresivo y con un riesgo asumido importante y, por tanto, con una mayor probabilidad de verse involucrado en un accidente en otras circunstancias.

En este apartado se van a estudiar los diferentes estilos de conducción en función de la tasa de deceleración, relacionando los datos referentes al factor humano, al viaje y al tipo de vehículo con la tasa de deceleración elegida.

Al igual que en los casos anteriores, este análisis, basado en los datos procedentes de las encuestas, se ha realizado por medio de un análisis multivariable. De esta forma se intenta evitar la confusión de efectos producidos por cada una de las variables, por la posible relación existente entre ellas.

Para la inclusión de las diferentes variables en el modelo, se han tenido en cuenta las consideraciones ya relacionadas en el apartado correspondiente en el estudio en tramos curvos y rectos.

El análisis se ha llevado a cabo con un conjunto de 2374 conductores-transición. Esta muestra se distribuye entre las variables según se muestra en las tablas 7.68-7.75.

	Conductor-transición
Hombre (1)	1751
Mujer (0)	583

Tabla 7.68 Muestra conductor-transición recta-curva de la variable CONDUCTOR

	Conductor· transición SI (1)	Conductor· transición NO (0)
18-20 años	60	2179
21-25 años	122	2117

26-30 años	285	1954
31-35 años	354	1885
36-40 años	315	1924
41-45 años	239	2000
46-50 años	229	2010
51-55 años	160	2079
56-60 años	150	2089
61-65 años	105	2134
66-70 años	124	2115
71-75 años	65	2174
76-80 años	24	2215
81-90 años	7	2232

Tabla 7.69 Muestra conductor· transición recta-curva de las variables relacionadas con la edad del conductor

	Conductor· transición SI (1)	Conductor· transición NO (0)
KM_POCOS	168	1891
KM_MEDIO	1077	982
KM_MUCHOS	814	1245

Tabla 7.70 Muestra conductor· transición recta-curva de las variables relacionadas con la experiencia del conductor

	Conductor· transición SI (1)	Conductor· transición NO (0)
VIAJE_CORTO	878	997
VIAJE_MEDIO	753	1122
VIAJE_LARGO	143	1732
VIAJE_RUTA	101	1774

Tabla 7.71 Muestra conductor· transición recta-curva de las variables relacionadas con la longitud del viaje

	Conductor· transición
Habitual (1)	1666
No habitual (0)	602

Tabla 7.72 Muestra conductor· transición recta-curva de la variable HABITUAL

	Conductor· transición
Laboral (1)	1341
No laboral (0)	780

Tabla 7.73 Muestra conductor· transición recta-curva de la variable LABORAL

	Conductor- transición
NIÑOS	105
ADULTOS	685
ANCIANOS	84

Tabla 7.74 Muestra conductor- transición recta-curva de las variables relacionadas con los ocupantes

	Conductor- transición SI (1)	Conductor- transición NO (0)
VH_LIGERO	1162	592
VH_CAMIONETA	20	1734
VH_FURGONETA	378	1376
VH_MONOVOLUMEN	70	1684
VH_TODOTERRENO	124	1630

Tabla 7.75 Muestra conductor- transición recta-curva de las variables relacionadas con la longitud del viaje

En la tabla 7.76 se muestran los resultados de este análisis, en el que se han incluido todas las variables relacionadas con el conductor, el viaje que este realiza y el tipo de vehículo que conduce. Estos resultados se agrupan en un modelo que explica un 4.33 % de la variabilidad de la tasa de deceleración elegida por los conductores en las transiciones recta-curva.

Parámetro	Estimación	Error	Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	0.869118	0.106765	8.14047	0.0000
CONDUCTOR	0.0586684	0.0377035	1.55605	0.1197
EDAD_21_25	0.0188134	0.114151	0.164811	0.8691
EDAD_26_30	-0.0956925	0.102892	-0.930025	0.3524
EDAD_31_35	-0.15122	0.102153	-1.48034	0.1388
EDAD_36_40	-0.0943029	0.102001	-0.924531	0.3552
EDAD_41_45	-0.0807492	0.106103	-0.761049	0.4466
EDAD_46_50	-0.190513	0.105683	-1.80268	0.0714
EDAD_51_55	-0.127588	0.109261	-1.16773	0.2429
EDAD_56_60	-0.239819	0.110773	-2.16495	0.0304
EDAD_61_65	-0.303989	0.116202	-2.61604	0.0089
EDAD_66_70	-0.185067	0.117823	-1.57072	0.1162
EDAD_71_75	-0.19874	0.122001	-1.62901	0.1033
EDAD_76_80	-0.377256	0.206353	-1.82821	0.0675
EDAD_81_90	-0.0722255	0.26347	-0.274132	0.7840
KM_POCOS	0.0160954	0.0605442	0.265845	0.7904
KM_MUCHOS	0.00282314	0.0323077	0.0873828	0.9304
VIAJE_CORTO	-0.124399	0.0324459	-3.83405	0.0001
VIAJE_LARGO	0.130045	0.0550039	2.36429	0.0181
VIAJE_RUTA	-0.0395861	0.0688698	-0.574796	0.5654
HABITUAL	-0.0218298	0.0327031	-0.667514	0.5044
LABORAL	-0.00143105	0.0356818	-0.0401059	0.9680
NIÑOS	-0.0680622	0.0513057	-1.3266	0.1846
ADULTOS	-0.0357542	0.0276138	-1.29479	0.1954
ANCIANOS	0.100851	0.0928244	1.08647	0.2773

VH_CAMIONETA	0.029537	0.125505	0.235344	0.8139
VH_FURGONETA	-0.0197578	0.0377274	-0.523699	0.6005
VH_MONOVOLUMEN	-0.0194083	0.074985	-0.258829	0.7958
VH_TODOTERRENO	-0.0485559	0.0559844	-0.867311	0.3858

Tabla 7.76 Resultados del análisis del estudio de la tasa de deceleración elegida

Del análisis de regresión multivariable, la mayoría de los parámetros analizados han resultado no significativos, a diferencia de lo ocurrido en el caso de la velocidad elegida, tanto en rectas como en curvas.

Las dos únicas variables que han presentado alguno de sus rangos significativos son: la edad y la longitud del viaje.

En cuanto a la edad, en general no hay variación en la tasa de deceleración, excepto los conductores cuya edad se encuentra entre 56 y 65 años, que presentan una deceleración inferior al resto.

Respecto a la longitud del viaje, se puede decir que los conductores que realizan un viaje corto presentan una deceleración menor, mientras que los que realizan un viaje largo deceleran más bruscamente.

Como ya se ha mencionado, el resto de las variables no han resultado significativas, por lo que su influencia no será determinante en la elección de la tasa de deceleración por parte de los conductores.

7.3.3.6. Estudio de la tasa de deceleración desarrollada por los conductores

A la vista de los resultados, se intuye que se han omitido del análisis variables explicativas clave, ya que el R^2 es inferior al 5 % y la mayor parte de las variables no han sido estadísticamente significativas. Unas de las variables más importantes en el caso de la deceleración pueden ser las características geométricas del trazado de la carretera.

Incluyendo estas variables en el análisis se han estudiado distintas combinaciones, siendo el modelo que se presenta en la tabla 7.77 el que mejores resultados ha producido, aunque el R^2 sea únicamente del 19.40 %. Además del parámetro de la clotoide, otras variables han resultado significativas, pero no han sido incluidas en el modelo final, ya que su aportación al R^2 es mínima.

Parámetro	Estimación	Error		Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	T	
CONSTANTE	0.300369	0.104157	2.8838	0.0039	
CONDUCTOR	0.0511681	0.0346207	1.47796	0.1394	
EDAD_21_25	0.0613768	0.104841	0.585425	0.5583	
EDAD_26_30	-0.0703881	0.0944841	-0.744973	0.4563	
EDAD_31_35	-0.134809	0.0937974	-1.43723	0.1507	
EDAD_36_40	-0.064751	0.0936704	-0.691265	0.4894	
EDAD_41_45	-0.00262867	0.0975385	-0.02695	0.9785	
EDAD_46_50	-0.161436	0.0970504	-1.66342	0.0962	
EDAD_51_55	-0.0684213	0.100386	-0.681584	0.4955	
EDAD_56_60	-0.191467	0.101751	-1.88172	0.0599	
EDAD_61_65	-0.241232	0.106762	-2.25953	0.0239	
EDAD_66_70	-0.0971576	0.108317	-0.896976	0.3697	

EDAD_71_75	-0.171323	0.112029	-1.52928	0.1262
EDAD_76_80	-0.270487	0.189579	-1.42678	0.1536
EDAD_81_90	-0.249013	0.242153	-1.02833	0.3038
KM_POCOS	-0.0357128	0.0556814	-0.641378	0.5213
KM_MUCHOS	0.0177849	0.029678	0.599262	0.5490
VIAJE_CORTO	-0.11864	0.0297925	-3.98221	0.0001
VIAJE_LARGO	0.019847	0.0509607	0.389458	0.6969
VIAJE_RUTA	-0.0558387	0.0632412	-0.882949	0.3773
HABITUAL	-0.00126634	0.0300535	-0.0421362	0.9664
LABORAL	0.0157926	0.0327788	0.481793	0.6299
NIÑOS	-0.0325342	0.0471579	-0.6899	0.4903
ADULTOS	-0.0505081	0.0253702	-1.99084	0.0465
ANCIANOS	0.028236	0.0853456	0.330843	0.7408
VH_CAMIONETA	-0.023982	0.115281	-0.208031	0.8352
VH_FURGONETA	-0.0446257	0.0346738	-1.28702	0.1981
VH_MONOVOLUMEN	0.0168125	0.0688843	0.244068	0.8072
VH_TODOTERRENO	-0.0321361	0.0514124	-0.625065	0.5319
1/A	53.8536	3.33362	16.1547	0.0000

Tabla 7.77 Resultados del análisis inicial del estudio de la tasa de deceleración desarrollada

La inclusión de las variables geométricas en el modelo ha supuesto la reducción del rango de edades significativas a las comprendidas entre 61 y 65 años, presentando una tasa de deceleración inferior al resto. Asimismo, el parámetro correspondiente a los conductores que recorren un viaje largo también ha dejado de ser significativo.

Sin embargo, una de las variables ha pasado a ser significativa: el número de pasajeros adultos. A pesar de ello, la diferencia es muy pequeña y su valor-P indica que está cerca de no ser significativa.

En el modelo se ha tenido en cuenta una gran cantidad de factores que pueden condicionar la elección de la tasa de deceleración en las transiciones recta-curva. No obstante, hay factores aleatorios que no se han considerado. Las zonas de transición elegidas se encuentran en 10 tramos de carretera convencional distintos, con características diferentes. En el caso de la velocidad desarrollada en rectas y en curvas, ya se ha comprobado la gran influencia de estas características, aumentando considerablemente la variabilidad explicada del modelo tras su incorporación. Esto es debido a que el entorno, la orografía, la señalización o incluso la jerarquía de la carretera puede condicionar considerablemente la forma de conducción.

Para el estudio de las tasas de deceleración desarrolladas por los conductores, como en los casos anteriores, se ha introducido en el modelo una serie de variables que se corresponden con cada uno de los tramos de toma de datos. Se trata de una variable dicotómica para cada uno de los tramos, de forma que su valor será 1 si el conductor se encuentra circulando por ese tramo y 0 si no es así. El tramo considerado se encuntra como referencia y que no se incluye en el modelo es el tramo 1.

El modelo resultante, calibrado a partir de 1257 conductores, que teniendo en cuenta que pueden haber circulado por zonas recta-curva distintas, producen una muestra de 2374 conductores-transición recta-curva, explica un 22.75 % de la variabilidad de la tasa de deceleración. En este caso, el incremento de R^2 ha sido mucho menor que

los anteriores por lo que se puede intuir que las características propias de cada tramo tienen una influencia menor en la deceleración que en las velocidades.

La tabla 7.78 muestra los resultados finales del estudio de la tasa de deceleración desarrollada en las transiciones recta-curva.

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	0.628692	0.122938	5.1139	0.0000
CONDUCTOR	0.0272926	0.0345035	0.791008	0.4289
EDAD_21_25	0.031986	0.103878	0.307919	0.7581
EDAD_26_30	-0.0887323	0.0938377	-0.945593	0.3444
EDAD_31_35	-0.153442	0.0929926	-1.65004	0.0989
EDAD_36_40	-0.0703712	0.0926294	-0.759707	0.4474
EDAD_41_45	0.00727742	0.0969495	0.075064	0.9402
EDAD_46_50	-0.158029	0.0958484	-1.64874	0.0992
EDAD_51_55	-0.0643795	0.0998884	-0.644514	0.5192
EDAD_56_60	-0.190031	0.100725	-1.88663	0.0592
EDAD_61_65	-0.236285	0.105529	-2.23905	0.0252
EDAD_66_70	-0.090756	0.107275	-0.846015	0.3975
EDAD_71_75	-0.156018	0.111482	-1.39948	0.1617
EDAD_76_80	-0.285804	0.186786	-1.53012	0.1260
EDAD_81_90	-0.359671	0.240646	-1.4946	0.1350
KM_POCOS	-0.0474197	0.055163	-0.859629	0.3900
KM_MUCHOS	0.0144194	0.0356187	0.404826	0.6856
VIAJE_CORTO	-0.0601505	0.0332018	-1.81167	0.0700
VIAJE_LARGO	-0.0262153	0.0515975	-0.508073	0.6114
VIAJE_RUTA	-0.0491347	0.0638367	-0.769693	0.4415
HABITUAL	-0.0187152	0.0301132	-0.621493	0.5343
LABORAL	0.0219519	0.0323722	0.67811	0.4977
NINOS	-0.0397306	0.0478511	-0.830296	0.4064
ADULTOS	-0.0661284	0.0252289	-2.62114	0.0088
ANCIANOS	0.0378673	0.0865997	0.437268	0.6619
VH_CAMIONETA	-0.108721	0.114533	-0.949255	0.3425
VH_FURGONETA	-0.0685263	0.0347861	-1.96993	0.0488
VH_MONOVOLUMEN	0.00379532	0.0679659	0.0558415	0.9555
VH_TODOTERRENO	-0.042707	0.0508156	-0.840432	0.4007
1/A	37.9322	5.43939	6.97362	0.0000
TRAMO_2	-0.121861	0.0588854	-2.06947	0.0385
TRAMO_3	-0.428402	0.063688	-6.72657	0.0000
TRAMO_4	-0.163271	0.103155	-1.58277	0.1135
TRAMO_5	-0.107642	0.0535602	-2.00974	0.0445
TRAMO_6	-0.310802	0.0658978	-4.71642	0.0000
TRAMO_7	-0.065174	0.0897294	-0.726339	0.4676
TRAMO_8	-0.195374	0.0751405	-2.60011	0.0093
TRAMO_9	-0.0957108	0.0731357	-1.30867	0.1906
TRAMO_10	-0.183617	0.0594729	-3.0874	0.0020

Tabla 7.78 Resultados del análisis del estudio de la tasa de deceleración desarrollada

A continuación, se detallan por categorías las principales consideraciones resultantes del modelo.

Género del conductor

El género del conductor no resulta significativo. No hay diferencia entre hombres y mujeres en la deceleración.

Edad del conductor

La edad de los conductores no es uno de los factores que más influyan en la elección de la deceleración. Salvo en el caso de los conductores entre 61 y 65 años que presentan una deceleración 0.23 m/s^2 inferior al resto.

Experiencia del conductor

La experiencia del conductor no es una variable significativa en la elección de la tasa de deceleración desarrollada.

Longitud del viaje

Según los resultados del análisis, la longitud del viaje no es una variable significativa. Por tanto, la tasa de deceleración en transiciones recta-curva no dependerá de ella.

Frecuencia del viaje

La frecuencia con la que se circula por una carretera no ha resultado significativa en el análisis de la deceleración.

Motivo del viaje

El motivo del viaje, distinguiendo si es por motivos laborales o no, no resulta significativo a la hora de elegir la tasa de deceleración.

Ocupantes

En el análisis de la influencia de la presencia de pasajeros en la tasa de deceleración desarrollada por el conductor, se muestra que la presencia de pasajeros adultos produce una reducción de 0.06 m/s^2 .

Tipo de vehículo

De la evaluación de la influencia del tipo de vehículo en la tasa de deceleración desarrollada, se desprende que únicamente los conductores de furgonetas presentan una tasa de deceleración inferior al resto.

Después de los análisis realizados se puede concluir que las variables que más influyen en las tasas de deceleración son las propias de la geometría del trazado de la carretera.

7.3.4. Análisis de los diferenciales de velocidad en las transiciones curva-recta

En el apartado anterior se ha modelizado y caracterizado la deceleración que se produce en las transiciones recta-curva, por su importancia en la evaluación del diseño geométrico de carreteras. La aceleración no juega un papel tan importante en la evaluación de la consistencia, sin embargo es esencial su modelización para la construcción completa de los perfiles continuos de velocidad de operación.

Por ello, en este apartado se va a analizar el fenómeno de la aceleración, modelizando su obtención a partir de las características geométricas de la carretera y estudiando su longitud y su ubicación. Pero no se va a profundizar, como en el caso de la deceleración, en los incrementos de velocidad que se producen entre la curva y la recta posterior.

Sí que se va a llevar a cabo, como en el resto de casos, un análisis de la influencia de las características del conductor, del viaje que realiza y del vehículo que conduce en las tasas de aceleración elegidas, a pesar de que su importancia no es tan reconocida como la de la deceleración.

La mayor parte de las investigaciones se han basado en datos de velocidad puntual medidos en el punto medio y final de la curva y en el punto medio de la recta posterior, asumiendo generalmente que la aceleración se produce únicamente en el tramo recto.

Al disponer en esta investigación de una nueva metodología que permite obtener los perfiles continuos de velocidad en tramos curva-recta, es posible localizar los puntos inicial y final de la aceleración en cada uno de los perfiles individuales, así como también determinar la velocidad asociada.

7.3.4.1. Secciones curva-recta a estudiar

Tras el estudio detallado de cada uno de los tramos presentados, se eligieron, para el estudio de la aceleración, 27 transiciones curva-recta. Esta elección está basada en la necesidad de que en una transición curva-recta, la aceleración libre se produzca debido a la aparición de una recta tras una curva que produzca la aceleración de los conductores. En el análisis de los diferentes tramos se ha estudiado cuidadosamente los diferentes perfiles de velocidad, ya que es posible que se produzca una aceleración entre una curva y una recta que no llegue a desarrollarse completamente por la aparición de otra curva. Esta situación provocaría resultados que no permitirían estudiar el fenómeno de forma aislada.

Las transiciones curva-recta seleccionadas se muestran en la tabla 7.79, caracterizadas por el Pk inicial y final de la curva, incluyendo la curva circular y las curvas de transición, y de la posterior recta.

Transición	Pk inicio curva	Pk final curva	Pk inicio recta	Pk final recta	Radio (m) curva	Longitud (m) recta
ACC0111	2862	3049	3049	3087	102	38
ACC0112	4669	4926	4926	5179	275	253
ACC0113	9919	10192	10192	12735	156	2543
ACC01V1	3049	2862	2862	1314	102	1548
ACC01V2	10192	9919	9919	9869	156	50
ACC0311	2658	2837	2837	3272	297	435
ACC0312	3272	3515	3515	3542	256	27
ACC03V1	2837	2658	2658	2332	297	326

ACC03V2	3515	3272	3272	2837	256	435
ACC04V1	2050	1767	1767	1656	242	111
ACC0511	628	749	749	1104	97	355
ACC0512	1226	1350	1350	1535	87	185
ACC0513	3432	3554	3554	3674	194	120
ACC05V1	749	628	628	361	97	267
ACC06V1	3184	3005	3005	2700	519	305
ACC07V1	1813	1610	1610	1327	236	283
ACC0811	2577	2673	2673	3628	105	955
ACC08V1	2673	2577	2577	2429	105	148
ACC08V2	5170	5068	5068	4935	138	133
ACC0911	5961	6088	6088	6345	152	257
ACC09V1	796	577	577	182	484	395
ACC1011	530	669	669	1102	261	433
ACC1012	1102	1276	1276	2341	208	1065
ACC1013	2341	2530	2530	3046	189	516
ACC10V1	669	530	530	0	261	530
ACC10V2	1276	1102	1102	669	208	433
ACC10V3	2530	2341	2341	1276	189	1065

Tabla 7.79 Transiciones curva-recta utilizadas en el estudio

El rango de pendientes en el que se encuentran estos tramos varía entre +5 % y -5 %, abarcando así un ámbito mayor que en la mayoría de las investigaciones en las que el estudio se suele reducir a pendientes de ± 4 %.

En la tabla 7.80 se muestran los intervalos entre los que varían las características geométricas más relevantes de estas transiciones. En el anexo XIII se recogen el resto de las características geométricas de las transiciones curva-recta evaluadas.

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
Radio de la curva (m)	87	519	209.96	107.88
Longitud de la curva (m)	96	283	178.44	56.81
Ángulo de deflexión (gon)	11.41	75.36	36.21	16.76
Longitud de la recta (m)	27	2543	544.70	565.15

Tabla 7.80 Rangos de las principales características geométricas de las transiciones curva-recta

A pesar de que hay dos rectas que pueden considerarse cortas, con el estudio del estado de alineaciones y del perfil de velocidad asociado al tramo correspondiente, se puede constatar que la curva posterior a la recta tiene un radio suficientemente

amplio para que se desarrolle una velocidad similar a la que correspondería a una recta, por lo que efectivamente se produce una transición curva-recta.

Después de estudiar la muestra utilizada para el estudio de la aceleración en investigaciones anteriores (tabla 7.81), se considera que esta muestra de 27 es suficiente para el rango de estudio.

	Muestra
Lamm et al. (1988)	6
Figueroa y Tarko (2007)	9

Tabla 7.81 Tamaños de muestra utilizados para el estudio de la aceleración

7.3.4.2. Variables consideradas en el estudio de las variaciones de velocidad en las transiciones curva-recta

En el presente apartado se hace una relación de las variables consideradas en el estudio de la transición curva-recta. Para ello, como se ha realizado en los casos anteriores, las variables se dividen en dos tipologías: las propias del trazado, obtenidas tras la restitución de la geometría de los diferentes tramos, y las variables relacionadas con el conductor, el vehículo y el viaje, cuyos valores se han obtenido de las encuestas.

Variables relacionadas con la geometría del trazado

Las variables geométricas y las combinaciones de estas utilizadas en el análisis de las variaciones de velocidad en las transiciones curva-recta, son:

- Curva:
 - Sentido de giro de la curva: horario/antihorario
 - Pendiente (tanto por uno)
 - Longitud de la curva (m): L_C
 - Ángulo de deflexión (gon): γ
 - Tasa de cambio de curvatura de la curva, incluyendo la curva circular y las curvas de transición (gon/km): CR_C
 - Curva circular:
 - Radio (m): R
 - Curvatura: la inversa del radio (m^{-1})
 - Longitud de la curva circular (m): L_{CC}
 - Clotoide anterior:
 - Longitud de la clotoide (m): L_{CL1}
 - Parámetro de la clotoide (m): A_1
 - Clotoide posterior:
 - Longitud de la clotoide (m): L_{CL2}
 - Parámetro de la clotoide (m): A_2
- Recta:
 - Longitud de la recta (m): L_R
 - Pendiente (tanto por uno)
- Tramo (el cálculo de las tasas es similar al explicado en el caso de curvas):

- Tasa de cambio de curvatura del tramo en el que se encuentra (gon/km), según la tramificación que se muestra en el anexo V: CCR
- Tasa de cambio de curvatura considerando la curva y la recta (gon/km) : $CCR_{C,R}$
- Tasa de cambio de curvatura de los 100 metros anteriores al inicio de la curva (gon/km): $CCR_{100\text{inicio}}$
- Tasa de cambio de curvatura de los 200 metros anteriores al inicio de la curva (gon/km): $CCR_{200\text{inicio}}$
- Tasa de cambio de curvatura de un tramo de 100 metros centrado en el punto medio de la curva (gon/km): $CCR_{100\text{ctro}}$

Se ha llevado a cabo un estudio de la correlación existente entre las diferentes variables citadas. La matriz resultante completa se encuentra en el anexo XIII.

Las conclusiones del análisis son muy similares a las obtenidas al analizar las variables geométricas con posible influencia en la velocidad de operación en curvas y en rectas y los decrementos de velocidad en las transiciones recta-curva. Como en estos casos, se han obtenido altas correlaciones entre las diferentes características geométricas de la curva. Asimismo, se han detectado correlaciones entre las diferentes tasas de cambio de curvatura y el ángulo de deflexión de la curva.

Variables relacionadas con el conductor, el vehículo y el viaje

De los datos procedentes de las encuestas realizadas a los conductores durante las jornadas de toma de datos, se van a utilizar las mismas variables que las utilizadas en el estudio de la velocidad en curvas y en rectas y de la deceleración:

- Conductor:
 - Sexo del conductor: hombre/mujer
 - Edad del conductor (años)
 - Kilómetros conducidos al año: pocos/medio/muchos
- Viaje:
 - Longitud del viaje: largo/medio/corto/ruta
 - Frecuencia del viaje: habitual/no habitual
 - Propósito del viaje: laboral/no laboral
- Ocupantes:
 - Número de niños
 - Número de adultos
 - Número de ancianos
- Vehículo:
 - Tipo de vehículo: turismo/todoterreno/monovolumen/furgoneta

Únicamente se muestra una relación de las diferentes variables ya que su descripción se ha realizado en el apartado de tratamiento de datos.

7.3.4.3. Estudio de la aceleración

El estudio de la aceleración incluye no sólo el desarrollo de un modelo que permita la estimación de las tasas de aceleración a partir de las características geométricas del trazado de la carretera, sino también la evaluación de la longitud de aceleración.

Modelización de la tasa de aceleración

Siguiendo las mismas consideraciones desarrolladas para la determinación de las tasas de deceleración, para la calibración del modelo de la tasa de aceleración se utilizarán los percentiles 85 de las tasas de aceleración individuales correspondientes a cada una de las transiciones curva-recta relacionadas anteriormente.

La aceleración individual de los conductores expresada en función de las velocidades en el inicio y final de la aceleración y de la longitud de la misma, se obtiene según la ecuación 92.

$$a_i = \frac{V_{fac_i}^2 - V_{iac_i}^2}{2D_i} \quad (92)$$

Donde:

a_i : aceleración del individuo i

V_{iac_i} : velocidad del individuo i en el inicio de la aceleración, generalmente correspondiente a la velocidad en la curva

V_{fac_i} : velocidad del individuo i al final de la aceleración, generalmente correspondiente a la velocidad en la recta

D_i : distancia empleada en la aceleración por el individuo i

A partir del conjunto de aceleraciones individuales obtenidas para cada una de las transiciones a estudiar, se obtiene el correspondiente percentil 85 de la aceleración, como la aceleración que no es superada por el 85 % de los individuos.

Influencia de las variables relacionadas con la geometría del trazado

Antes de proceder a la modelización de la tasa de aceleración se ha realizado un estudio en profundidad de los datos disponibles y de la relación entre la variable a modelizar y las variables geométricas.

Con los datos de la muestra se ha llevado a cabo un estudio de correlación entre la tasa de aceleración calculada en las transiciones curva-recta y las variables geométricas correspondientes a cada uno de los tramos. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 7.82, donde aparecen únicamente las variables que presentan una correlación con la tasa de deceleración diferente de cero con un nivel de confianza del 95 %.

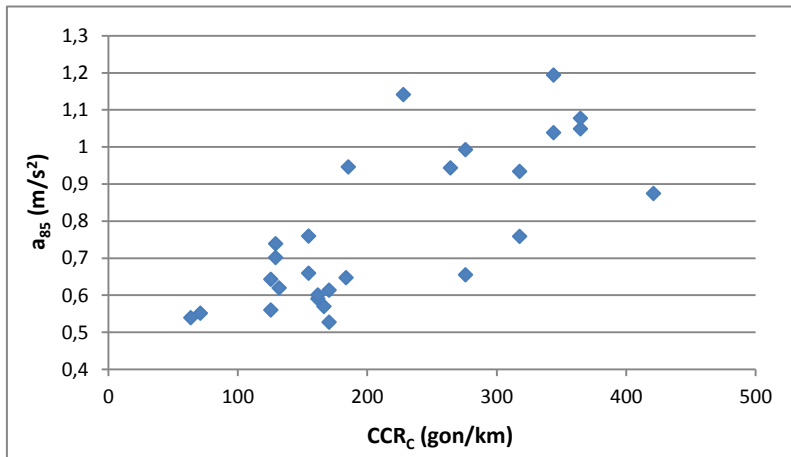
	correlación	tamaño muestra	Valor-p
CCR_c	0.7549	27	0.0000

$CCR_{100ctro}$	0.5723	27	0.0018
Pdte curva	-0.4052	27	0.0360
L_C	-0.6329	27	0.0004
L_{CL2}	-0.6782	27	0.0001
R	-0.6912	27	0.0001
L_{CL1}	-0.7046	27	0.0000
A_2	-0.7905	27	0.0000
A_1	-0.8309	27	0.0000

Tabla 7.82 Resultados del análisis de correlación de la tasa de aceleración

Este es el único caso en el que la pendiente presenta una correlación significativa con una variable del percentil 85, aun siendo la que menor relación tiene con la tasa de aceleración.

La variable que mayor correlación positiva muestra con la tasa de aceleración es la tasa de cambio de curvatura de la curva. En la figura 7.139 se representa esta relación, aumentando la aceleración al aumentar la tasa de cambio de curvatura de la curva.

Figura 7.139 CCR_C vs a_{85}

En cuanto a correlaciones negativas, las variables que destacan son los parámetros de las clotoides adyacentes a la curva y sus longitudes. Han resultado significativas y con valor similar las correlaciones de las características de las dos clotoides. Sin embargo, solamente se va a considerar en el estudio el parámetro y la longitud de la clotoide posterior a la curva, ya que, como ha ocurrido en análisis anteriores, es muy probable que las características de la otra presenten correlación simplemente por tratarse, en la mayoría de los casos, de clotoides simétricas.

La figura 7.140 se ha representado la relación entre estas dos variables y el percentil 85 de la aceleración. Entre ellas, la variable que mejor correlación presenta, tanto estadísticamente como gráficamente, es el parámetro de la clotoide.

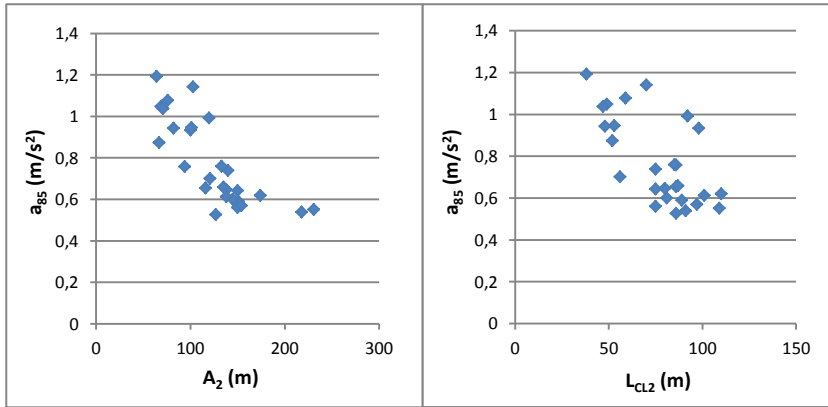


Figura 7.140 Parámetro y longitud de la clotoide posterior a la curva vs a_{85}

Además de las características de la clotoide ubicada entre la curva y la recta, también presenta una alta correlación con la aceleración el radio de la curva. Como ocurría en el caso de la deceleración, la tasa de aceleración disminuye al aumentar el radio (ver figura 7.141). Esta disminución es más acusada en valores bajos del radio, tendiendo a un valor de la aceleración de 0.5 para curvas de radios grandes.

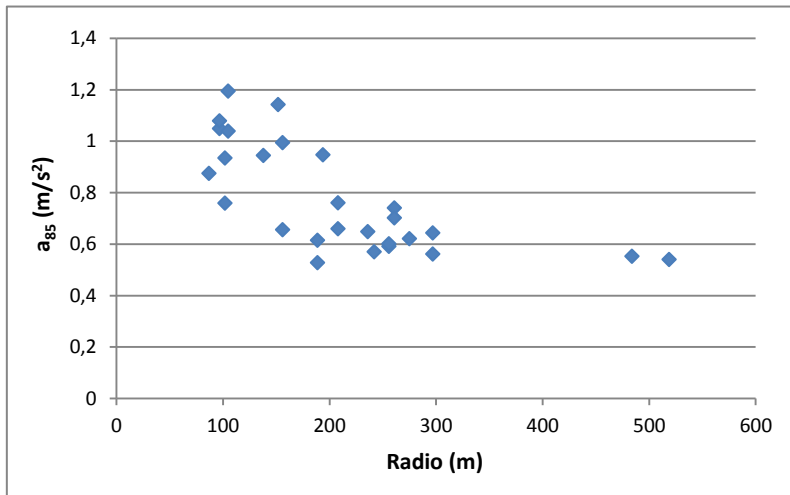


Figura 7.141 Radio vs a_{85}

Modelización de la tasa de aceleración

Del análisis de la influencia de las diferentes variables en la tasa de aceleración, se concluye que aquellas que mayor correlación presentan estadísticamente y que gráficamente mejor comportamiento muestran son el radio de la curva y el parámetro

de la clotoide posterior a esta. No obstante, en la modelización se incluirá también la tasa de cambio de curvatura de la curva como variable independiente.

En la fase inicial de la calibración de los modelos se han evaluado diferentes modelos basados en regresión lineal simple calibrados a partir de los datos de la muestra, tomando como variables independientes las mencionadas en el párrafo anterior. Los modelos que mejores resultados han presentado en el porcentaje de variabilidad de la tasa de aceleración explicada son los que se muestran en la tabla 7.83, junto con los valores asociados de R^2 y R^2 ajustado.

Modelo	Expresión	R^2	R^2 ajustado
ACC1	$a_{85} = 0.440564 + 56.1105/R$	57.16%	55.44%
ACC2	$a_{85} = 0.288379 + 54.2151/A$	68.84%	67.59%
ACC3	$a_{85} = 1.26087 - 0.00389428 \cdot A$	62.49%	60.99%
ACC4	$a_{85} = 1/\{-1.49325 + 0.548458 \cdot \ln(R)\}$	61.65%	60.11%
ACC5	$a_{85} = 1/\{-2.58809 + 0.830981 \cdot \ln(A)\}$	70.88%	69.72%
ACC6	$a_{85} = 1/\{2.48605 - 0.0777095 \cdot \sqrt{CCR_c}\}$	59.99%	58.38%

Tabla 7.83 Modelos de regresión lineal simple para la estimación de la a_{85}

Los tres primeros se han obtenido mediante regresión lineal simple. Con el parámetro de la clotoide como variable explicativa se ha calibrado un modelo que depende directamente de ella y otro que depende de la inversa de esta. También se ha utilizado la transformación inversa de la variable independiente en el caso del radio de la curva. Como puede observarse en la figura 7.142, los dos primeros modelos se aproximan mejor al comportamiento de los datos que el tercero.

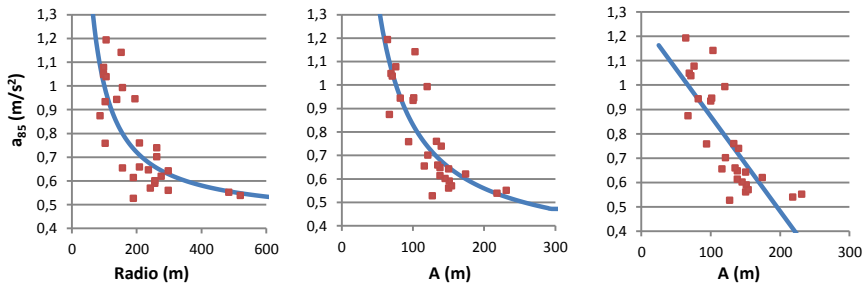


Figura 7.142 Modelos de regresión lineal para la estimación de la a_{85} : ACC1, ACC2 y ACC3

La variabilidad explicada por los modelos puede aumentarse mediante diferentes transformadas de las variables que los constituyen. De esta forma, en el caso de los tres últimos modelos se ha recurrido a la función inversa de la variable dependiente, combinada con el logaritmo neperiano de la variable independiente en los modelos ACC4 y ACC5, y con la raíz cuadrada de la variable independiente en el modelo ACC6. La representación de los modelos resultantes se muestra en la figura 7.143.

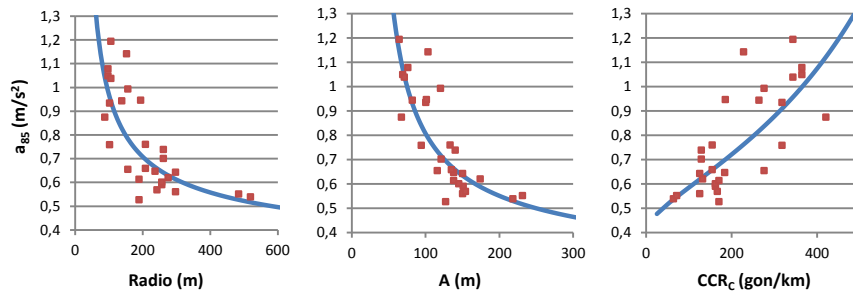


Figura 7.143 Modelos de regresión lineal para la estimación de la a_{85} : ACC4, ACC5 y ACC6

En ella, se observan ciertas mejoras en el ajuste de los datos, aunque las diferencias entre los modelos ACC1 y ACC4, y ACC2 y ACC5, son prácticamente inapreciables en el rango de valores de los datos de la muestra. Considerando su comportamiento en caso de que la curva tuviera un radio tan amplio que pudiera considerarse una recta, el comportamiento de cada uno de los modelos sería:

- El modelo ACC1 estimaría la aceleración en 0.44 m/s^2
- El modelo ACC2 estimaría la aceleración en 0.28 m/s^2
- El modelo ACC3 estima aceleraciones negativas para valores del parámetro de la clotoide superiores a poco más de 300 m
- Los modelos ACC4 y ACC5 disminuyen continuamente aunque con pendientes muy bajas
- El modelo ACC6 estimaría la aceleración en 0.4 m/s^2

Por lo tanto, es factible considerar que los modelos que mejor se adaptan son el ACC4 y el ACC5. Sin embargo, el ajuste estudiado únicamente puede asegurarse para el rango de valores de los datos de la muestra.

Evaluación de la longitud de aceleración

En el estudio del fenómeno de la aceleración, como en el de la deceleración, no sólo es importante considerar las tasas correspondientes, sino también la longitud de la misma y su localización. Gracias a los perfiles continuos de velocidad individuales, obtenidos con la nueva metodología de toma de datos, es posible determinar la longitud y localización de la aceleración para cada uno de los vehículos.

Del análisis individualizado de estas aceleraciones se ha realizado una clasificación de los diferentes tipos de aceleración dependiendo de la localización del inicio y final de la misma. En la tabla 7.84 se muestra la tipología considerada y el porcentaje de aparición en la muestra analizada.

Tipo deceleración	CL1	CC	CL2	R	%
1 – Comienzo en la segunda clotoide y fin en la recta posterior a la curva					43.44%
2 – Comienzo en la curva circular y fin en la recta posterior a la curva					15.91%
3 – Comienzo y fin en la recta posterior a la curva					14.96%
4 – Comienzo en la primera clotoide y fin en la recta posterior a la curva					7.58%

5 – Comienzo y fin en la segunda clotoide			6.89%
6 – Comienzo en la primera clotoide y fin en la segunda clotoide			4.50%
7 – Comienzo en la curva circular y fin en la segunda clotoide			3.87%

Donde:

- R: recta posterior a la curva
- CL1: primera clotoide
- CC: curva circular
- CL2: segunda clotoide

Tabla 7.84 Tipos de aceleración y porcentaje de aparición en la muestra considerada

La suma de los porcentajes de aparición de los tipos de aceleración no presentados en la tabla 7.84 es inferior al 3 %.

En la mayoría de los casos, la aceleración se desarrolla tanto en la curva como en el tramo recto, por lo que la hipótesis utilizada por la mayoría de modelos de que la aceleración se produce únicamente en el tramo recto no se ajusta al comportamiento de los conductores (sólo en el 15 % de los casos). De hecho, el comportamiento mayoritario de los conductores consiste en el inicio de la aceleración en la curva (82.91 % de los casos).

Con el fin de completar el estudio se ha evaluado la posibilidad de modelizar la longitud de la aceleración en función de las características geométricas de la carretera, así como también el porcentaje de aceleración en el tramo curvo y en el tramo recto. Sin embargo, los resultados no han sido concluyentes, por lo que es posible que estas variables dependan más de características motivacionales del conductor que del diseño geométrico de la transición recta-curva.

No obstante, el estudio de las aceleraciones individuales muestra que el porcentaje medio de longitud de aceleración que tiene lugar en la recta posterior a la curva es 53.85 %, 37.64 % en la segunda clotoide, 5.06 % en la curva circular, 2.98 % en la primera clotoide y 0.4 % en la recta anterior a la curva.

Un estudio similar se ha llevado a cabo para los vehículos cuya aceleración se corresponde con el percentil 85 de la aceleración, para cada una de las transiciones curva-recta analizadas. En este caso, el porcentaje medio de la longitud de aceleración que tiene lugar en la recta posterior a la curva es 34.79 %, 55.79 % en la segunda clotoide, 6.17 % en la curva circular, 3.23 % en la primera clotoide y 0 % en la recta anterior a la curva.

De acuerdo con estos resultados, para la construcción de los perfiles continuos de velocidad se puede asumir que la aceleración comienza en la segunda clotoide y finaliza en la recta posterior a la curva, manteniendo la velocidad en la curva circular constante. En el caso de no disponer de clotoide, según el estudio de los casos de la muestra, se recomienda situar el 50 % de la aceleración en el tramo recto y el 50 % restante en el tramo circular.

7.3.4.4. Estudio de la tasa de aceleración elegida por los conductores

A pesar de que, generalmente, los estudios relacionados con el comportamiento de los conductores no se han centrado en la aceleración para la evaluación de los

diferentes estilos de conducción, una mayor o menor tasa de aceleración también puede caracterizarlos.

Por ello, en la presente investigación se ha realizado, como en el caso de velocidad y de la tasa de deceleración, un análisis con el fin de evaluar la influencia de las características del conductor, del viaje que realiza y del vehículo que conduce en las tasas de aceleración elegidas, a pesar de que su importancia no ha sido tan reconocida como la de la deceleración.

El análisis se ha basado en los datos procedentes de las encuestas y se ha realizado mediante un análisis multivariante. Así, se intenta evitar la posible confusión de efectos producidos por cada una de las variables, por la posible relación entre ellas. Las variables se han incluido en el modelo siguiendo las consideraciones relacionadas en los apartados correspondientes a los estudios en los tramos rectos, curvos y transiciones recta-curva.

El análisis se ha llevado a cabo con un conjunto de 1658 conductores-transición. Esta muestra se distribuye entre las variables según se muestra en las tablas 7.85-7.92.

	Conductor-transición
Hombre (1)	1183
Mujer (0)	439

Tabla 7.85 Muestra conductor-transición curva-recta de la variable CONDUCTOR

	Conductor- transición SI (1)	Conductor- transición NO (0)
18-20 años	39	1464
21-25 años	93	1410
26-30 años	192	1311
31-35 años	221	1282
36-40 años	195	1308
41-45 años	158	1345
46-50 años	153	1350
51-55 años	112	1391
56-60 años	104	1399
61-65 años	73	1430
66-70 años	90	1413
71-75 años	50	1453
76-80 años	36	1467
81-90 años	2	1501

Tabla 7.86 Muestra conductor- transición curva-recta de las variables relacionadas con la edad del conductor

	Conductor- transición SI (1)	Conductor- transición NO (0)
KM_POCOS	133	1252
KM_MEDIO	769	616
KM_MUCHOS	483	902

Tabla 7.87 Muestra conductor- transición curva-recta de las variables relacionadas con la experiencia del conductor

	Conductor- transición SI (1)	Conductor- transición NO (0)
VIAJE_CORTO	677	580
VIAJE_MEDIO	434	823
VIAJE_LARGO	82	1175
VIAJE_RUTA	64	1193

Tabla 7.88 Muestra conductor- transición curva-recta de las variables relacionadas con la longitud del viaje

	Conductor- transición
Habitual (1)	1156
No habitual (0)	405

Tabla 7.89 Muestra conductor- transición curva-recta de la variable HABITUAL

	Conductor- transición
Laboral (1)	853
No laboral (0)	570

Tabla 7.90 Muestra conductor- transición curva-recta de la variable LABORAL

	Conductor- transición
NIÑOS	73
ADULTOS	448
ANCIANOS	70

Tabla 7.91 Muestra conductor- transición curva-recta de las variables relacionadas con los ocupantes

	Conductor- transición SI (1)	Conductor- transición NO (0)
VH_LIGERO	806	363
VH_CAMIONETA	14	1155
VH_FURGONETA	226	943
VH_MONOVOLUMEN	41	1128
VH_TODOTERRENO	82	1087

Tabla 7.92 Muestra conductor- transición curva-recta de las variables relacionadas con la longitud del viaje

La tabla 7.93 refleja los resultados del análisis, en el que se han incluido las variables relacionadas con el conductor, el viaje que este realiza y el tipo de vehículo que conduce. El modelo calibrado explica el 5.63 % de la variabilidad de la tasa de aceleración elegida por los conductores en las transiciones curva-recta.

Parámetro	Estimación	Error	Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	0.723672	0.0838644	8.62908	0.0000
CONDUCTOR	-0.00120819	0.0292452	-0.0413125	0.9670
EDAD_21_25	-0.0765042	0.0858101	-0.891552	0.3726
EDAD_26_30	-0.0195089	0.0795486	-0.245246	0.8063
EDAD_31_35	-0.099278	0.0789368	-1.25769	0.2085
EDAD_36_40	-0.0606751	0.0788136	-0.769855	0.4414
EDAD_41_45	-0.118553	0.0819865	-1.446	0.1482
EDAD_46_50	-0.0977021	0.0820689	-1.19049	0.2339
EDAD_51_55	-0.153216	0.0837246	-1.83	0.0672
EDAD_56_60	-0.141296	0.0855886	-1.65088	0.0988
EDAD_61_65	-0.14199	0.0902257	-1.57372	0.1156
EDAD_66_70	-0.189998	0.090093	-2.10892	0.0350
EDAD_71_75	-0.178786	0.0894892	-1.99785	0.0457
EDAD_75_80	-0.145167	0.09608	-1.5109	0.1308
EDAD_81_90	-0.131642	0.346352	-0.380082	0.7039
KM_POCOS	-0.0417325	0.0461521	-0.904238	0.3659
KM_MUCHOS	-0.0262987	0.0254754	-1.03232	0.3019
VIAJE_CORTO	-0.0632733	0.025652	-2.4666	0.0136
VIAJE_LARGO	-0.0421314	0.0462142	-0.911656	0.3619
VIAJE_RUTA	-0.0850957	0.0557538	-1.52628	0.1269
HABITUAL	-0.000932944	0.026073	-0.035782	0.9715
LABORAL	0.00143041	0.026932	0.053112	0.9576
NINOS	-0.0580169	0.0387812	-1.49601	0.1347
ADULTOS	-0.0227329	0.0225268	-1.00915	0.3129
ANCIANOS	0.197772	0.0653599	3.02588	0.0025
VH_CAMIONETA	0.134975	0.093699	1.44052	0.1497
VH_FURGONETA	-0.0363142	0.03131	-1.15983	0.2461
VH_MONOVOLUMEN	-0.0229024	0.0630037	-0.363509	0.7162
VH_TODOTERRENO	-0.0591325	0.0438179	-1.3495	0.1772

Tabla 7.93 Resultados del análisis del estudio de la tasa de aceleración elegida

Como ocurre en el estudio de la deceleración, del análisis de regresión multivariable, la mayoría de los parámetros analizados no han resultado significativos.

Las dos únicas variables que han presentado alguno de sus rangos significativos son: la edad y la longitud del viaje. También ha resultado significativa la presencia de pasajeros ancianos.

En cuanto a la edad, en general no hay variación en la tasa de aceleración, excepto los conductores cuya edad se encuentra entre 66 y 75 años, que presentan una aceleración inferior al resto.

Respecto a la longitud del viaje, se puede decir que los conductores que realizan un viaje corto presentan una aceleración menor.

7.3.4.5. Estudio de la tasa de aceleración desarrollada por los conductores

El R^2 obtenido en el modelo anterior es inferior al 6 % y la mayor parte de las variables no han resultado significativas, por lo que se intuye que se han omitido del análisis variables explicativas clave. Algunas de estas variables pueden estar relacionadas con la geometría de la carretera.

Para su inclusión en el análisis se han estudiado diferentes combinaciones, siendo el modelo que se presenta en la tabla 7.94 el que mejores resultados ha producido con un R^2 de 13.87 %, inferior incluso al correspondiente al modelo de tasas de deceleración en esta misma fase de análisis.

Parámetro	Estimación	Error		Estadístico T	Valor-P
		Estándar			
CONSTANTE	0.450033	0.0856117		5.25668	0.0000
CONDUCTOR	-0.0141374	0.0279914		-0.505061	0.6135
EDAD_21_25	-0.0580796	0.0820507		-0.70785	0.4790
EDAD_26_30	0.0123413	0.0761208		0.162128	0.8712
EDAD_31_35	-0.062248	0.075565		-0.823767	0.4101
EDAD_36_40	-0.0250207	0.0754395		-0.331666	0.7401
EDAD_41_45	-0.059311	0.0786403		-0.754207	0.4507
EDAD_46_50	-0.0681203	0.0785168		-0.86759	0.3856
EDAD_51_55	-0.0859483	0.0803723		-1.06938	0.2849
EDAD_56_60	-0.105517	0.0819083		-1.28823	0.1977
EDAD_61_65	-0.0871376	0.0864567		-1.00788	0.3135
EDAD_66_70	-0.124195	0.0864223		-1.43707	0.1507
EDAD_71_75	-0.120144	0.0857846		-1.40054	0.1614
EDAD_75_80	-0.14576	0.0918427		-1.58706	0.1125
EDAD_81_90	-0.191101	0.331141		-0.577097	0.5639
KM_POCOS	-0.064862	0.0441897		-1.46781	0.1422
KM_MUCHOS	-0.0303731	0.024356		-1.24705	0.2124
VIAJE_CORTO	-0.0523722	0.0245499		-2.13329	0.0329
VIAJE_LARGO	-0.0577669	0.0442094		-1.30667	0.1913
VIAJE_RUTA	-0.0880325	0.0532959		-1.65177	0.0986
HABITUAL	0.00797951	0.0249423		0.319919	0.7490
LABORAL	0.0146548	0.0257852		0.568342	0.5698
NIÑOS	-0.0227086	0.037273		-0.60925	0.5424
ADULTOS	-0.0157512	0.021547		-0.731017	0.4648
ANCIANOS	0.163672	0.0625896		2.615	0.0089
VH_CAMIONETA	0.0833029	0.0897462		0.928205	0.3533
VH_FURGONETA	-0.0339725	0.0299303		-1.13505	0.2564
VH_MONOVOLUMEN	-0.0337604	0.0602369		-0.560461	0.5752
VH_TODOTERRENO	-0.0379242	0.0419502		-0.904029	0.3660
CCR _c	0.00100436	0.000110283		9.10714	0.0000

Tabla 7.94 Resultados del análisis inicial del estudio de la tasa de aceleración desarrollada

La inclusión de las variables geométricas en el modelo ha supuesto la desaparición de la edad como variable significativa, en ninguno de sus rangos. Las otras dos variables, que habían resultado significativas en el estudio de la tasa elegida, también lo son al incluir la tasa de cambio de curvatura de la curva en el modelo y en una magnitud similar.

Como se desprende de su baja explicabilidad, hay factores que no se han considerado en el estudio. Las zonas de transición elegidas se encuentran en 9 tramos de carretera convencional distintos, con características diferentes (no se ha elegido ninguna transición recta-curva del tramo 2). En los casos anteriores se ha comprobado que estas características tienen una gran influencia en las variables dependientes, aumentando considerablemente la variabilidad explicada del modelo tras su incorporación. Esto es debido a que el entorno, la orografía, la señalización o incluso la jerarquía de la carretera puede condicionar considerablemente la forma de conducción.

Para el estudio de las tasas de aceleración desarrolladas por los conductores, como en los casos anteriores, se ha introducido en el modelo una serie de variables que se corresponden con cada uno de los tramos de toma de datos. Se trata de una variable dicotómica para cada uno de los tramos, de forma que su valor será 1 si el conductor se encuentra circulando por ese tramo y 0 si no es así. El tramo considerado como referencia y que no se incluye en el modelo es el tramo 1.

El modelo resultante, calibrado a partir de 969 conductores, que teniendo en cuenta que pueden haber circulado por zonas curva-recta distintas, producen una muestra de 1658 conductores-transición curva-recta, explica un 17.60 % de la variabilidad de la tasa de aceleración. El incremento de R^2 es muy bajo, por lo que se puede intuir que las características propias de cada tramo no tienen una gran influencia en la aceleración.

La tabla 7.95 muestra los resultados finales del estudio de la tasa de aceleración desarrollada en las transiciones curva-recta.

Parámetro	Estimación	Error	Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	0.521377	0.0969488	5.37786	0.0000
CONDUCTOR	-0.0229042	0.0278902	-0.821226	0.4115
EDAD_21_25	-0.027381	0.0809247	-0.338351	0.7351
EDAD_26_30	0.0458842	0.0753561	0.608898	0.5426
EDAD_31_35	-0.0291668	0.0747855	-0.390006	0.6965
EDAD_36_40	0.00588927	0.0745564	0.0789909	0.9370
EDAD_41_45	-0.0249202	0.0778535	-0.320091	0.7489
EDAD_46_50	-0.0364192	0.0774343	-0.470324	0.6381
EDAD_51_55	-0.0502254	0.0796819	-0.630325	0.5285
EDAD_56_60	-0.0903851	0.0809709	-1.11627	0.2643
EDAD_61_65	-0.0392185	0.0855758	-0.45829	0.6467
EDAD_66_70	-0.0932561	0.0854431	-1.09144	0.2751
EDAD_71_75	-0.0758155	0.0852499	-0.889333	0.3738
EDAD_75_80	-0.122882	0.0909157	-1.3516	0.1765
EDAD_81_90	-0.0571808	0.327245	-0.174734	0.8613
KM_POCOS	-0.0421029	0.0439886	-0.957131	0.3385
KM_MUCHOS	0.0255239	0.0290891	0.877439	0.3802
VIAJE_CORTO	-0.0663838	0.0256034	-2.59277	0.0095
VIAJE_LARGO	-0.0526139	0.0452365	-1.16309	0.2448
VIAJE_RUTA	-0.100045	0.0529963	-1.88778	0.0591
HABITUAL	0.0136405	0.0251498	0.54237	0.5876
LABORAL	0.0130741	0.0254384	0.51395	0.6073
NINOS	-0.0375649	0.0375869	-0.999417	0.3176

ADULTOS	-0.0102902	0.0215403	-0.47772	0.6328
ANCIANOS	0.131457	0.0630019	2.08656	0.0369
VH_CAMIONETA	0.0879599	0.0894981	0.982814	0.3257
VH_FURGONETA	-0.0227273	0.0301999	-0.752561	0.4517
VH_MONOVOLUMEN	-0.0280389	0.0594427	-0.471697	0.6371
VH_TODOTERRENO	-0.0260189	0.0416348	-0.624931	0.5320
CCR_CL_C_CL	0.000395238	0.00018802	2.10211	0.0355
TRAMO_3	-0.0957079	0.0435703	-2.19663	0.0280
TRAMO_4	-0.166782	0.0745353	-2.23763	0.0252
TRAMO_5	0.107224	0.0408454	2.62511	0.0087
TRAMO_6	-0.121842	0.062012	-1.96481	0.0494
TRAMO_7	0.202139	0.324154	0.623589	0.5329
TRAMO_8	0.178853	0.0527916	3.38792	0.0007
TRAMO_9	0.224211	0.0648628	3.45669	0.0005
TRAMO_10	0.000549617	0.0461656	0.0119053	0.9905

Tabla 7.95 Resultados del análisis del estudio de la tasa de aceleración desarrollada

A continuación, se detallan por categorías las principales consideraciones resultantes del modelo.

Género del conductor

El género del conductor no resulta significativo. No hay diferencia entre hombres y mujeres en la aceleración.

Edad del conductor

La edad de los conductores no es uno de los factores que influyen en la elección de la aceleración.

Experiencia del conductor

La experiencia del conductor no es una variable significativa en la elección de la tasa de aceleración desarrollada.

Longitud del viaje

Según los resultados del análisis, los conductores que realizan un viaje corto desarrollan una aceleración 0.066 m/s^2 inferior al resto.

Frecuencia del viaje

La frecuencia con la que se circula por una carretera no ha resultado significativa en el análisis de la aceleración.

Motivo del viaje

El motivo del viaje, distinguiendo si es por motivos laborales o no, no resulta significativo a la hora de elegir la tasa de aceleración.

Ocupantes

En el análisis de la influencia de la presencia de pasajeros en la tasa de aceleración desarrollada por el conductor, se muestra que la presencia de pasajeros ancianos produce un aumento de 0.131 m/s^2 .

Tipo de vehículo

El tipo de vehículo no es una variable significativa, por tanto la tasa de aceleración no dependerá de él.

Después de los análisis realizados se puede concluir que, al igual que en el caso de la deceleración, las variables que más influyen en las tasas de aceleración son las propias de la geometría del trazado de la carretera.

7.4. PERFIL CONTINUO DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA

En los apartados anteriores se han calibrado diferentes modelos, tanto para estimar la velocidad en tramos rectos y curvos como para estimar las tasas de aceleración y deceleración. Con una combinación adecuada de estos modelos es posible estimar un perfil continuo de la velocidad de operación que sirva como base para la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de un tramo de carretera convencional.

7.4.1. Modelos utilizados

A continuación, se presenta una selección de los modelos calibrados, considerando el mejor ajuste a los datos, pero también su sencillez con el fin de facilitar el cálculo. Asimismo, se ha tenido en cuenta que su comportamiento fuera del rango de valores de los datos de la muestra sea coherente con el fenómeno estimado. De esta forma, se aumentan las probabilidades de poder generalizar su uso en la mayor parte de las configuraciones de trazado geométrico posibles.

7.4.1.1. Estimación de la velocidad en curvas

Se han calibrado diferentes modelos para la estimación de la velocidad en curvas, con diferentes características geométricas como variables explicativas y con distintas transformaciones de las mismas y de la variable dependiente.

Finalmente, el modelo seleccionado viene definido por la ecuación 93.

$$V_{85} = 106.863 - 60.1185/e^{0.00422596 \cdot R} \quad (93)$$

Su R^2 es de 72.14 %. Este valor únicamente ha sido superado por los modelos que incluyen el parámetro de la clotoide como variable explicativa. No se ha optado por estos modelos, a pesar de que consiguen explicar una mayor variabilidad de la velocidad en curvas, con el objetivo de poder utilizar el modelo elegido no sólo en curvas con clotoides anexas sino también en aquellas que no dispongan de curvas de transición.

La figura 7.144 muestra la representación gráfica del modelo seleccionado. En ella, se observa claramente como el modelo estima velocidades de operación positivas, incluso para radios muy pequeños, propios de zonas urbanas, para los que se

obtendría una velocidad aproximada de 50 km/h. Su comportamiento también es aceptable para curvas con radios amplios, para los que se tiende a 106.8 km/h.

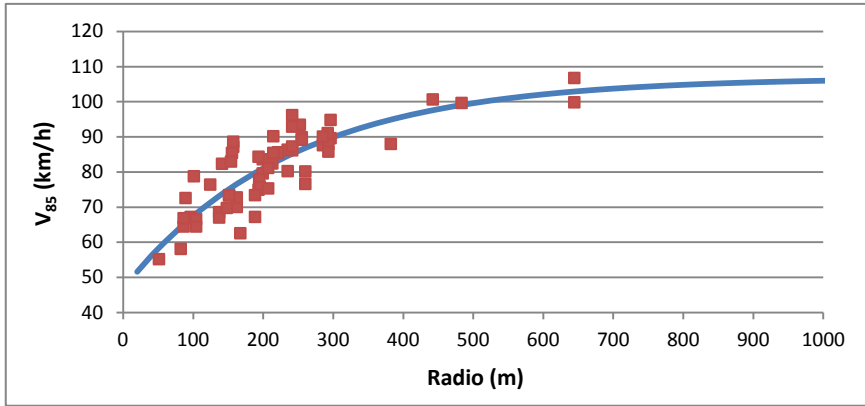


Figura 7.144 Modelo para la estimación de la V_{85} en curvas

7.4.1.2. Estimación de la velocidad en rectas

El estudio de los datos y de las relaciones entre las diferentes características geométricas del trazado y la velocidad de operación desarrollada en las rectas, así como también la calibración de los modelos, ha concluido con la clasificación de las rectas en tres grupos:

- Rectas con longitud mayor o igual a 700 metros. El modelo propuesto explica un 74.24 % de la variabilidad de la velocidad de operación en este tipo de rectas. Su expresión viene definida por la ecuación 94.

$$V_{85} = \sqrt{-1464.72 + 351.288 \cdot \sqrt{L}} \tag{94}$$

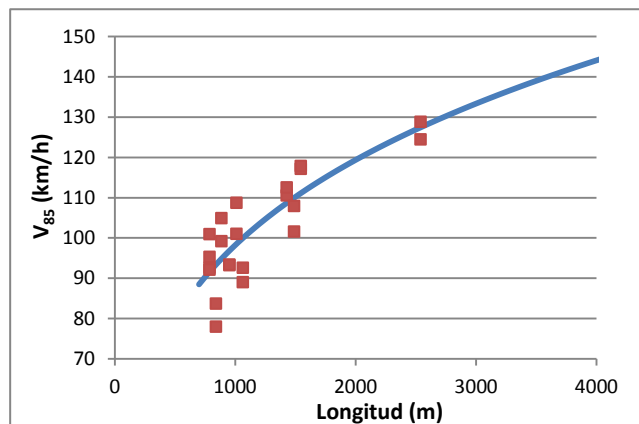


Figura 7.145 Modelo para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud mayor o igual a 700 metros

En la figura 7.145 muestra cómo su tendencia es creciente, a diferencia del modelo alternativo en el que se tendía a 135 km/h. Podría ser viable elegir el otro modelo ya que se podría asumir que esta velocidad se corresponde con la velocidad deseada de los conductores. Sin embargo, el modelo alternativo subestima la velocidad para longitudes entre 2500 y 3500 metros, aproximadamente. Por tanto, teniendo en cuenta que las rectas de una longitud superior no suelen utilizarse en el diseño geométrico de una carretera convencional, se asume el modelo propuesto como válido.

- Rectas con longitud inferior a 700 metros. Dentro de este grupo se distinguen dos casuísticas:
 - Radio de la curva anterior menor o igual a 600 metros. El modelo no lineal calibrado para la estimación de su velocidad de operación explica un 45.48 % de la variabilidad y viene definido por la ecuación 86.

$$V_{85} = 0.362739 \cdot V_{85C} + 59.6982 / e^{-0.0000472302 \cdot GM}$$

$$V_{85C} = 106.863 - 60.1185 / e^{0.00422596 \cdot R_1} \tag{95}$$

$$GM = \frac{L \cdot (R_1 \cdot R_2)^{0.5}}{100}$$

Su representación se muestra en la figura 7.146.

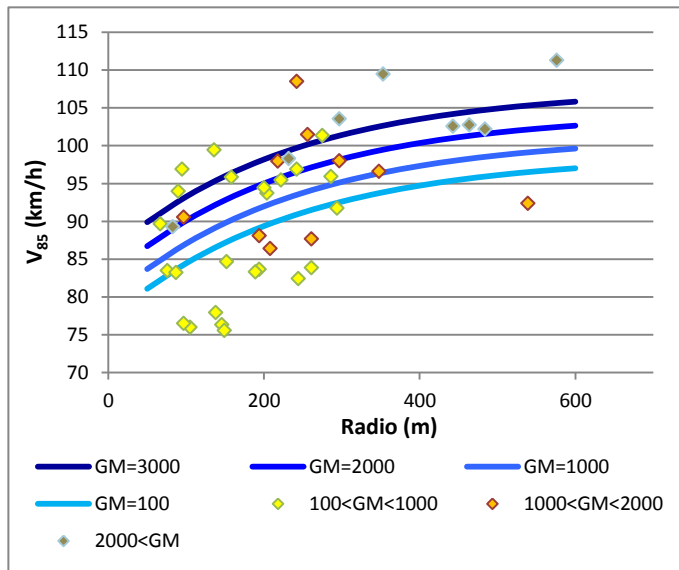


Figura 7.146 Modelo de regresión para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud inferior a 700 m y radio de la curva anterior inferior o igual a 600 m

- Radio de la curva anterior superior a 600 metros. Debido al extraño comportamiento ya descrito de estos datos, hasta obtener

resultados mejores en una investigación posterior, se propone el modelo calibrado para la totalidad de la muestra de rectas que, con un R^2 de 44.73 %, se define por la ecuación 87.

$$V_{85} = \sqrt{7399.27 + 3.03956 \cdot L} \quad (96)$$

Su representación se muestra en la figura 7.147.

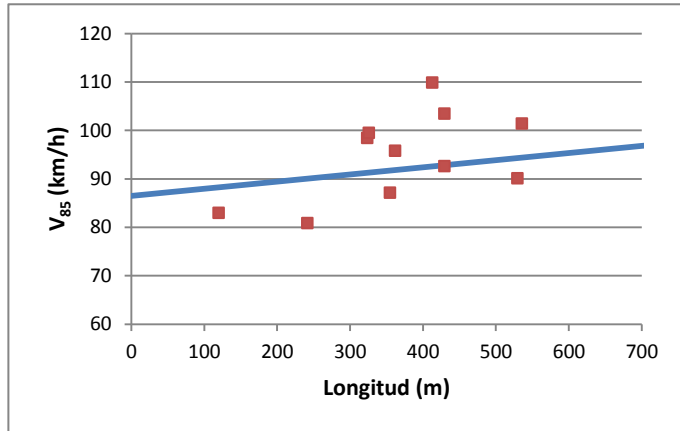


Figura 7.147 Modelo de regresión para la estimación de la V_{85} en rectas de longitud inferior a 700 m y radio de la curva anterior superior a 600 m

7.4.1.3. Estimación de la tasa de deceleración

Durante la modelización del percentil 85 de la tasa de deceleración, se han obtenido mediante regresión 6 modelos diferentes. Las variables explicativas consideradas han sido el radio de la curva, el parámetro de la clotoide anterior a esta y la tasa de cambio de curvatura de ella. El modelo que mejor correlación (73.40 %) ha presentado con los datos se define mediante la ecuación 97.

$$d_{85} = \sqrt{-0.0652071 + 201.174/R} \quad (97)$$

Su representación se muestra en la figura 7.148.

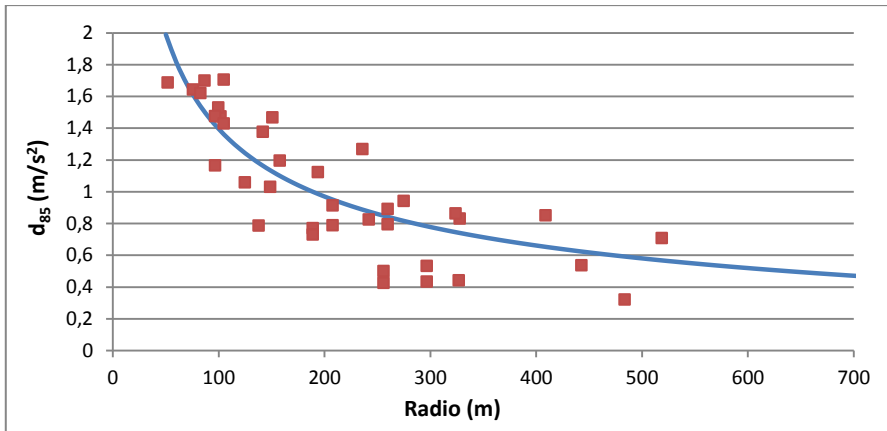


Figura 7.148 Modelo para la estimación de la d_{85}

Con este modelo se obtienen valores de deceleración cercanos a 2 m/s^2 para curvas de radio 50 metros. Para curvas de radio 3080 metros, el valor de deceleración estimado será 0.01 m/s^2 . A partir de ese valor, la deceleración se considerará nula.

7.4.1.4. Estimación de la tasa de aceleración

En el proceso de modelización del percentil 85 de la tasa de aceleración, se han obtenido también 6 modelos diferentes, siendo las variables explicativas de los mismos: el radio de la curva, el parámetro de la clotoide posterior a esta y la tasa de cambio de curvatura de ella.

El modelo que mejor correlación (70.88 %) ha presentado con los datos tiene como variable explicativa el logaritmo neperiano del parámetro de la clotoide. Teniendo en cuenta que en el proceso de aplicación de estos modelos pueden aparecer curvas sin clotoides, se propone para la estimación de la tasa de aceleración, en lugar de este modelo, el modelo que, con el radio de la curva como variable explicativa, se define mediante la ecuación 98.

$$a_{85} = 1 / (-1.49325 + 0.548458 \cdot \ln(R)) \quad (98)$$

Este modelo, que explica un 61.65 % de la variabilidad de la aceleración, está representado en la figura 7.149.

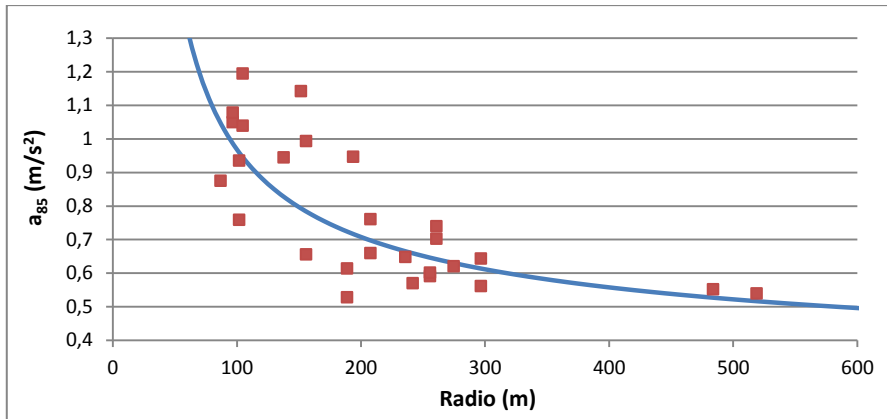


Figura 7.149 Modelo para la estimación de la a_{85}

Con este modelo se obtienen valores de aceleración cercanos a 1.50 m/s^2 para curvas de radio 50 metros. Para curvas de radio amplio, el modelo disminuye continuamente, aunque con pendientes muy bajas. Así, en el caso de radios del entorno de 3000 metros, la aceleración a la recta siguiente sería de alrededor de 0.34 m/s^2 .

7.4.2. Reglas de construcción del modelo continuo de perfil de velocidad de operación en carreteras convencionales

Para la obtención de perfiles continuos de velocidad de operación no es suficiente con aplicar los modelos anteriores de forma aislada, sino que es necesario combinarlos siguiendo ciertas reglas de construcción. Estas reglas se refieren especialmente a la aplicación de la aceleración y deceleración entre las velocidades de elementos consecutivos.

Regla de construcción 0

El primer paso para la construcción del perfil continuo de velocidad de operación consiste en la determinación de la velocidad de operación en las rectas y en las curvas circulares utilizando los modelos descritos en el apartado anterior.

Regla de construcción 1

Esta regla de construcción se refiere al caso en el que una curva se encuentra aislada entre dos rectas con velocidad de operación mayor.

La unión entre la velocidad de operación en la recta anterior y la velocidad de operación en la curva se realiza mediante el modelo de deceleración presentado. Para la localización de la deceleración se tendrá en cuenta que únicamente se realiza en los tramos rectos y de transición. Además, ya que la curva circular es el tramo en el que la velocidad es menor, se considerará como el elemento de control y en ella la velocidad será constante. Por tanto, la deceleración terminará en el punto de inicio de la curva circular y su longitud vendrá dada por la ecuación 99.

$$D = \frac{V_{85(recta)}^2 - V_{85(curva)}^2}{2a_{85}} \tag{99}$$

La unión entre la velocidad de operación en la curva y la velocidad de operación en la recta posterior se realizará de forma similar pero utilizando el modelo de aceleración presentado. Para la localización de la aceleración se considerará de nuevo la curva circular como el elemento de control y, por tanto, la velocidad en ella será constante, comenzando la aceleración en el primer punto de la clotoide posterior. La longitud de la aceleración vendrá dada por la ecuación 100.

$$D = \frac{V_{85(curva)}^2 - V_{85(recta)}^2}{2a_{85}} \tag{100}$$

En la figura 7.150 se muestra un esquema de esta regla de construcción.

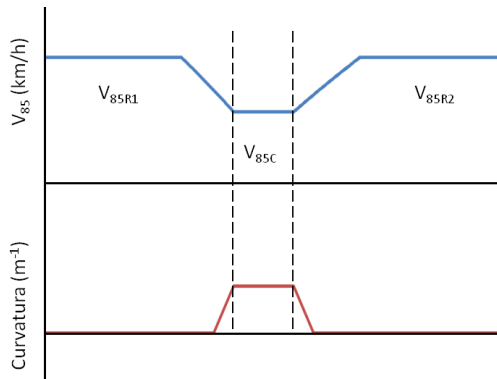


Figura 7.150 Regla de construcción 1 del perfil continuo de velocidad de operación

Regla de construcción 2

La aplicación de esta regla de construcción permite la construcción del perfil de velocidad de operación en un tramo formado por dos curvas consecutivas aisladas por una recta de velocidad superior a ellas. En realidad esta combinación es el duplicado de la presentada en el caso anterior.

En la figura 7.151 se muestra un esquema de esta construcción. En ella se observa cómo las dos curvas, al ser las de menor velocidad, se comportan como el elemento de control y la aceleración y la deceleración comienza y termina, respectivamente, en ellas, manteniendo su velocidad constante.

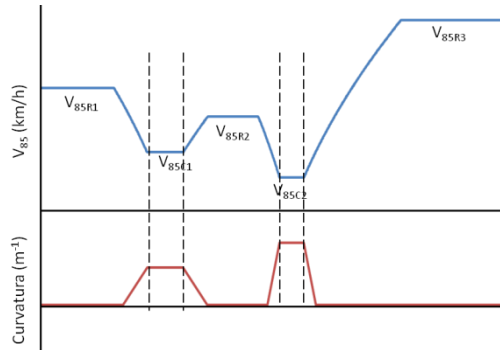


Figura 7.151 Regla de construcción 2a del perfil continuo de velocidad de operación

Esta regla de construcción tiene una particularidad, ya que puede darse el caso en que la longitud intermedia (incluyendo clotoides y recta) no sea suficiente para el desarrollo completo de la aceleración y la deceleración. Cuando esto ocurre no se alcanza la velocidad de operación correspondiente al tramo recto, produciéndose el esquema que se presenta en la figura 7.152.

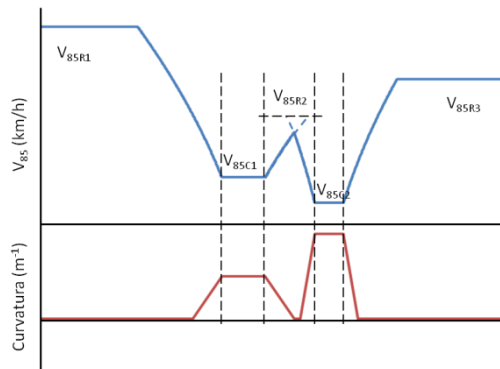


Figura 7.152 Regla de construcción 2b del perfil continuo de velocidad de operación

Regla de construcción 3

La regla de construcción 3 se define para la combinación de alineaciones recta1-curva1-recta2-curva2-recta3 cuando la velocidad de operación estimada en la segunda recta se encuentra entre la velocidad de la curva 1 y la velocidad de la curva 2. En este caso, entre la primera curva y la segunda recta se produce una deceleración.

La construcción del perfil para la segunda curva será similar al explicado en la regla de construcción 0. Sin embargo, por la situación planteada, la construcción del perfil en la primera curva variará considerablemente.

La transición de la primera recta a la primera curva seguirá el proceso descrito en la regla de construcción 0, siendo el elemento de control la curva. Pero en la transición curva1-recta2 el elemento de control pasará a ser la recta, por tener una velocidad

inferior. Por tanto, la deceleración acabará en el inicio de la recta. La principal cuestión es qué deceleración utilizar en la combinación curva-recta, ya que la deceleración que se ha modelizado es para la transición recta-curva.

Para solventar este problema se propone estimar, a partir de la velocidad en la recta y la ecuación de la velocidad en curvas calibrada, el radio de la curva equivalente que tendría la misma velocidad que la recta. Con este radio equivalente se estima la deceleración del tramo mediante el modelo calibrado inicialmente, comportándose la recta como una curva.

La figura 7.153 muestra un esquema de la construcción del perfil de velocidad para esta combinación de alineaciones.

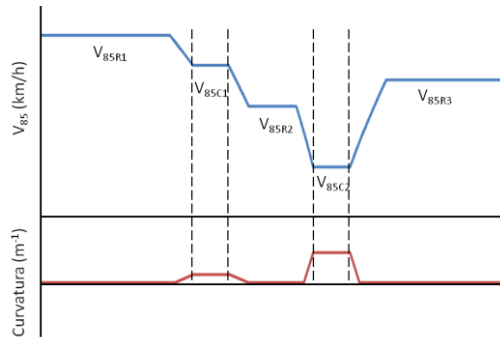


Figura 7.153 Regla de construcción 3a del perfil continuo de velocidad de operación

Al llevar a cabo esta construcción puede ocurrir que la longitud de la primera curva no sea suficiente para el desarrollo de las deceleraciones, dando como resultado el esquema que se muestra en la figura 7.154.

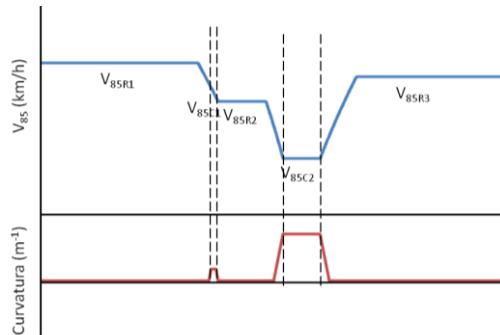


Figura 7.154 Regla de construcción 3b del perfil continuo de velocidad de operación

Otra particularidad de esta regla de construcción se produce cuando no aparece recta intermedia entre las curvas, siendo la primera de velocidad superior a la segunda. La deceleración se calculará con la ecuación calibrada para su estimación, utilizando como variable independiente el radio de la segunda curva.

Para la localización de la deceleración, se considerará como elemento de control la segunda curva, al presentar una velocidad inferior. Por tanto, la velocidad de operación en ella será constante y la deceleración acabará en su punto inicial.

La representación de esta variante de la regla de construcción 3 aparece en la figura 7.155.

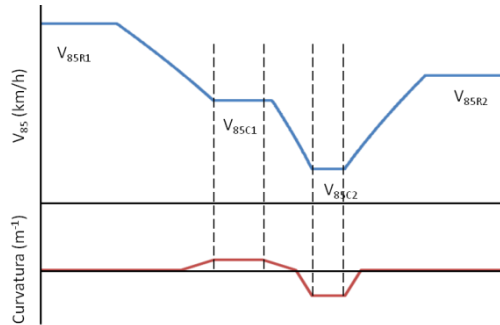


Figura 7.155 Regla de construcción 3c del perfil continuo de velocidad de operación

Regla de construcción 4

La regla de construcción 4 se basa en la situación simétrica a la anterior. Esta regla sienta las bases para la estimación de la velocidad de operación de la combinación de alineaciones recta1-curva1-recta2-curva2-recta3 cuando la velocidad de operación estimada en la segunda recta se encuentra entre la velocidad de la curva 1 y la velocidad de la curva 2, siendo esta última superior a las demás. En este caso se produce una aceleración entre la segunda recta y la segunda curva.

El proceso de construcción del perfil de velocidad en la primera curva es similar al descrito en la regla de construcción 0.

Para el cálculo de la aceleración que se produce entre la segunda recta y la segunda curva se utilizará el modelo calibrado para la tasa de aceleración. Como variable independiente se empleará el radio de la curva equivalente a la segunda recta, es decir, el radio que resulta de introducir en la ecuación de la velocidad en curvas la velocidad de la recta.

Para la ubicación de la aceleración se considerará como elemento de control la recta, por tener una velocidad inferior. Por tanto, la aceleración comenzará en el punto final de la recta y se prolongará con la tasa calculada hasta alcanzar la velocidad de la curva. En este caso, la velocidad no tiene por qué ser constante en toda la longitud de la curva circular.

La representación gráfica de esta regla de construcción se muestra en la figura 7.156.

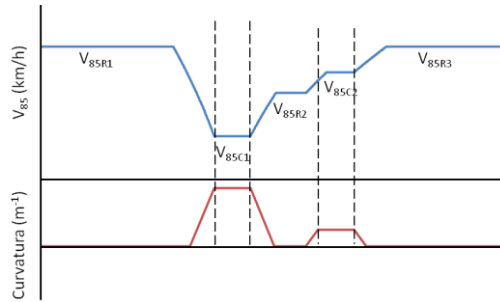


Figura 7.156 Regla de construcción 4a del perfil continuo de velocidad de operación

Como en el caso anterior, la longitud de la segunda curva puede no ser suficiente para el desarrollo de las aceleraciones. Cuando se produzca esta situación, la construcción del perfil será similar al de la figura 7.157.

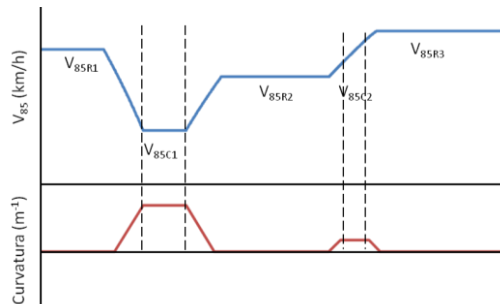


Figura 7.157 Regla de construcción 4b del perfil continuo de velocidad de operación

En el caso en que no haya recta intermedia entre las curvas, siendo la primera de velocidad inferior a la segunda, la aceleración entre ellas se calculará con la ecuación calibrada para su estimación, utilizando como variable independiente el radio de la primera curva.

La localización de la aceleración se realizará considerando como elemento de control la primera curva, al ser la de velocidad inferior. La velocidad en ella será constante y aceleración comenzará en su punto final.

La representación de esta variante de la regla de construcción 4 aparece en la figura 7.158.

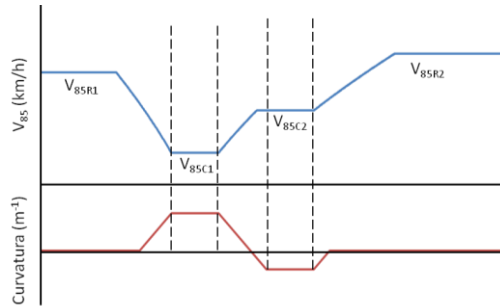


Figura 7.158 Regla de construcción 4c del perfil continuo de velocidad de operación

Con la aplicación de estas reglas de construcción, es posible obtener una estimación aceptable del perfil de velocidad de operación en un tramo de carretera convencional.

7.5. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DEL PERFIL CONTINUO DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN EN CARRETERAS CONVENCIONALES

Una vez calibrados los diferentes modelos parciales y definidas las reglas de construcción para combinarlos con el fin de obtener un perfil de velocidad de operación continuo, es necesario proceder a su validación. Para ello, se ha aplicado el proceso de construcción del modelo a cada uno de los tramos de carretera convencional estudiados. Asimismo, para cada uno de ellos se ha construido también el perfil de velocidad de operación continuo resultante de la aplicación del modelo recogido en el IHSDM, descrito en el apartado del estado del arte, por su importancia a nivel mundial.

Ambos perfiles se han comparado con el perfil de velocidad de operación obtenido de la toma de datos, denominado en la validación como perfil empírico, mientras que los procedentes de la construcción a partir de modelos serán considerados como perfiles estimados.

En la figura 7.159 se muestra la representación conjunta del perfil de velocidad de operación empírico y los perfiles estimados procedentes de la aplicación del modelo propuesto y del modelo aplicado en el IHSDM. De esta forma, puede realizarse un análisis visual de las diferencias y de la calidad del ajuste.

En esta figura se muestran los perfiles correspondientes al trayecto de ida del tramo 1 analizado. En el anexo XV se recogen el resto de gráficos correspondientes a este análisis.

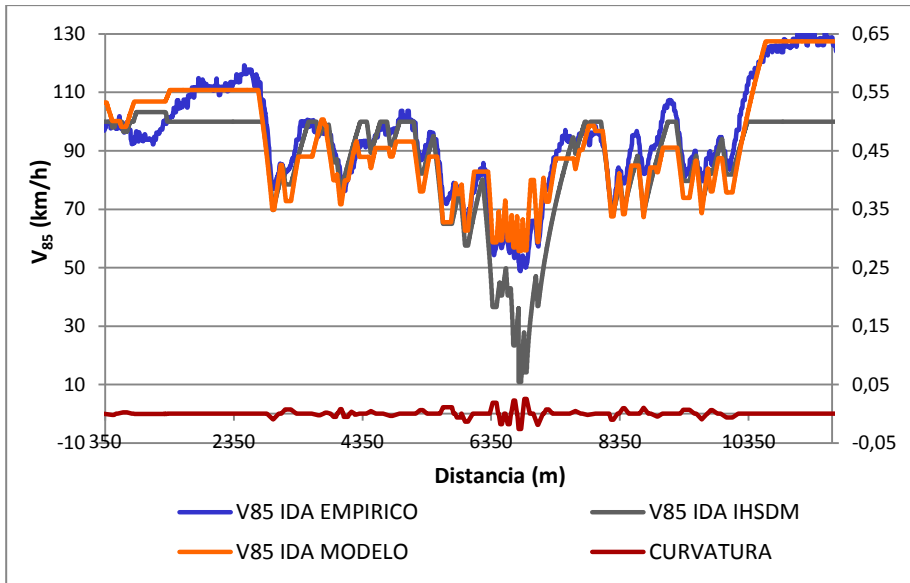


Figura 7.159 Comparación entre el perfil de velocidad empírico y los estimados

7.5.1. Resultados del análisis visual

De la evaluación visual de la representación gráfica de los tres perfiles para cada uno de los tramos, pueden extraerse diferentes conclusiones iniciales que, posteriormente, serán completadas con el análisis detallado de las diferencias entre ellos.

A continuación, se realiza una descripción somera del comportamiento del modelo planteado al aplicarlo para la geometría de cada uno de los tramos:

- Tramo 1. El modelo del IHSDM subestima considerablemente la velocidad en rectas largas, mientras que en rectas cortas la diferencia entre el ajuste obtenido del IHSDM y el modelo propuesto depende de los radios de las curvas adyacentes.

En tramos con curvas de radio reducido consecutivas, el modelo del IHSDM subestima la velocidad, mientras que con el modelo propuesto, se obtienen buenos resultados.

En curvas con radios amplios y ángulos de deflexión inferior a 4 gonios, el modelo propuesto muestra una velocidad muy superior a la que se esperaría, incluso sin compararlo con el perfil de velocidad empírico. Hay que tener en cuenta que el siguiente valor de ángulo de deflexión es superior a 6 gonios.

Se ha recalculado el perfil de velocidades con un estado de alineaciones en el que se ha convertido este tipo de curvas en rectas. Esta modificación ha dado un ajuste que provoca una mejora considerable en el entorno de los

puntos 800 y 4230 metros en el trayecto de ida y alrededor del punto de 4230 metros en el de vuelta.

De la observación de este tramo se ha concluido que en el caso de que haya una curva con ángulo de deflexión inferior a 4 gonios y, al menos, una de las rectas adyacentes tenga una longitud reducida, la combinación de las tres alineaciones recta-curva-recta se considerará como una única recta.

- Tramo 2. En este tramo se ha detectado una curva con un ángulo de deflexión de 4.109 gonios con rectas adyacentes de reducida longitud que presenta un comportamiento similar al descrito para el tramo anterior.

En este caso, el modelo también se ha recalculado a partir del estado de alineaciones en el que la curva se ha convertido en parte de la recta. La diferencia entre la velocidad estimada por ambos modelos no es tan acusada como en el caso anterior. El perfil de velocidad empírico se encuentra entre los dos perfiles estimados.

- Tramo 3. El inicio de este tramo consiste en una combinación de rectas y curvas de radio amplio y reducido ángulo de deflexión, que se extiende durante aproximadamente 2.5 km. En el tramo final hay un trazado similar durante menos de 1 km. En estos dos tramos la diferencia entre el perfil empírico y el perfil estimado es bastante acusada.

Teniendo en cuenta el comportamiento observado en los dos tramos anteriores, se ha recalculado el perfil de velocidad a partir de un estado de alineaciones modificado en el que todas las curvas con ángulo de deflexión inferior a 5 gonios se han convertido en rectas.

Esta solución ha dado como resultado que en el tramo inicial, al convertirse en una recta larga, la velocidad estimada ha aumentado considerablemente, mostrando una gran diferencia con la velocidad empírica. En el tramo final, el resultado ha sido el opuesto, la alineación se ha convertido en una recta de 744 metros y la velocidad resultante subestima la velocidad real.

La mejor solución se ha obtenido cuando se han considerado como rectas las curvas con un ángulo de deflexión inferior a 5 gonios y con, al menos, una recta adyacente de longitud inferior a 100 metros.

- Tramo 4. En este tramo no hay ninguna curva con las características anteriores, por lo que no se ha recalculado el perfil de velocidades.

Se ha observado como el modelo tiende a subestimar la velocidad en las curvas y en rectas de corta longitud.

- Tramo 5. El perfil generado por el modelo se adapta bastante bien a los datos, aunque se observa una sobreestimación en la recta que comienza en la zona del punto de 1900 metros y mide 789 metros de longitud.

Hay tres curvas con ángulo de deflexión inferior a 5 gonios y con, al menos, una de las rectas adyacentes de longitud inferior a 100 metros. Al

convertirlas en rectas, el perfil de velocidad resultante se ajusta mucho mejor al perfil empírico que el anterior.

- Tramo 6. En este tramo no hay curvas con ángulos de deflexión reducidos. No obstante, se ha estimado una sobreestimación de la velocidad, aunque esta sobreestimación es mayor en el caso de la aplicación del modelo del IHSDM.
- Tramo 7. En este tramo existe una curva con un ángulo de deflexión de 4.92 gonios entre rectas adyacentes de longitud superior a 100 metros. El modelo se ha recalculado después de convertir esta curva en una recta. El resultado ha producido un ajuste peor que el obtenido con el modelo inicial, por lo que se ha concluido que cuando las rectas adyacentes sean de longitud superior a 100 metros la curva se mantendrá como tal.
- Tramo 8. En este tramo aparecen cinco curvas con ángulo de deflexión inferior a 5 gonios. Salvo en el caso de la última curva, todas tienen una recta adyacente de longitud inferior a 100 metros. Tras recalcular el perfil con las cuatro curvas convertidas en rectas, el ajuste al perfil empírico ha sido mejor.
- Tramo 9. Hay una curva de ángulo inferior a 5 gonios y con una recta adyacente inferior a 100 metros. El perfil de velocidad resultado de convertir esta curva en recta se ajusta al perfil empírico mejor que el inicial, aunque la diferencia es bastante pequeña.
- Tramo 10. No hay curvas que precisen su conversión a rectas para un mejor ajuste. Sin embargo, sí que se observa como el perfil estimado sobreestima las velocidades, aunque en menor medida que el modelo del IHSDM.

Del análisis realizado, se ha concluido que en el caso de que el tramo de carretera convencional estudiado presente una curva con ángulo de deflexión inferior a 5 gonios y con, al menos, una recta adyacente de longitud inferior a 100 metros, esta será absorbida por las rectas anteriores y el perfil de velocidad será calculado a partir del estado de alineaciones modificado.

En el anexo XV se muestran los gráficos con todos los perfiles para cada tramo y un detalle de las modificaciones entre el modelo original y las modificaciones planteadas tras observar su comportamiento.

7.5.2. Análisis del comportamiento del modelo en curvas circulares

En el presente apartado se analiza el comportamiento del modelo para la estimación del perfil continuo de velocidad en carreteras convencionales propuesto en curvas circulares. Para ello, el procedimiento ha sido el siguiente:

- a) Obtención de los perfiles continuos de velocidad de operación de cada uno de los tramos de estudio, a partir de la combinación de los modelos propuestos según las reglas de construcción correspondientes. En los casos en los que aparezca una curva de ángulo de deflexión inferior a 5 gonios y con, al menos, una recta adyacente de longitud inferior a 100

metros, será considerada a efectos del cálculo del perfil de velocidad como una recta.

- b) Obtención de los perfiles continuos de velocidad de operación de cada uno de los tramos de estudio, a partir de los modelos de estimación y de las reglas constructivas propuestas por el IHSDM.
- c) Identificación de los puntos del tramo de carretera que se encuentran dentro de una curva circular.
- d) Identificación de las velocidades de estos puntos en los perfiles de velocidad de operación (perfil empírico, perfil propuesto y perfil IHSDM).
- e) Obtención para cada punto de la diferencia entre la velocidad del perfil de velocidad de operación empírico y las velocidades de los perfiles estimados.
- f) Cálculo para cada una de las curvas del error cuadrático medio (ECM), tanto para el perfil de velocidad de operación obtenido con el modelo propuesto como para el perfil de velocidad de operación obtenido con el modelo del IHSDM. El ECM se calculará según la ecuación 101.

$$ECM_j = \frac{\sum_i^n (V_{85 \text{ empírico } i} - V_{85 \text{ estimado } i})^2}{n} \quad (101)$$

donde:

ECM_j : error cuadrático medio de la curva j

$V_{85 \text{ empírico } i}$: velocidad de operación en el punto i obtenido del perfil empírico

$V_{85 \text{ estimado } i}$: velocidad de operación en el punto i obtenido del perfil estimado (el propuesto o el del IHSDM)

n : número de puntos de la curva circular j

Con el fin de obtener valores con un orden de magnitud más comprensible, se ha utilizado en lugar del ECM su raíz, es decir, la raíz cuadrática media (RCM). Una vez obtenida la RCM para cada curva y para cada perfil estimado, se relacionan estos errores con las características geométricas principales. En la figura 7.160 se muestra la relación entre la RCM y el radio de la curva. En ella se observa cómo, en general, los errores producidos por el IHSDM son mayores que los producidos por el modelo propuesto, especialmente para radios de curva reducidos.

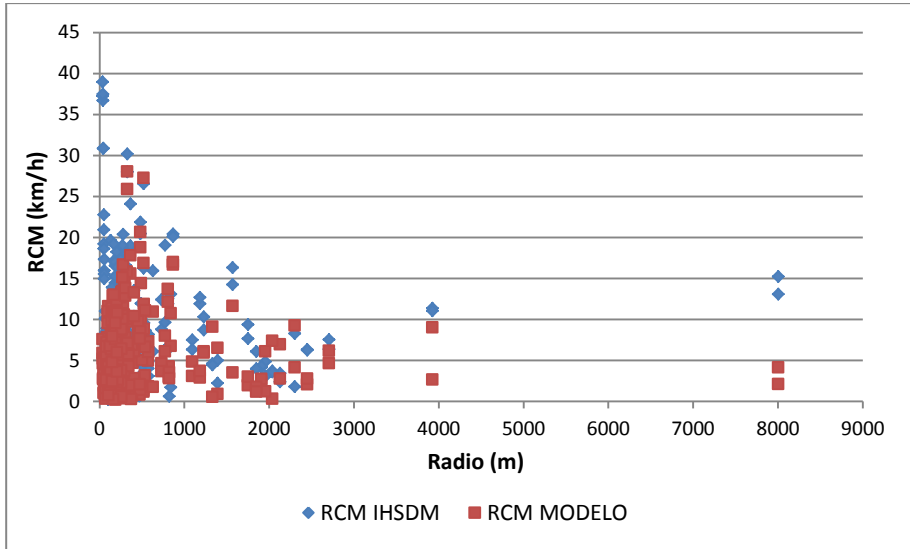


Figura 7.160 RCM de los perfiles estimados de velocidad de operación en curvas

En la figura se aprecia claramente cómo, a pesar de haber realizado esta evaluación con 304 curvas, hay tipos de curvas en las que el tamaño de muestra es muy reducido. Este es el caso de curvas con radio superior a 3000 metros. Por tanto, el análisis deberá completarse con un estudio posterior en la que la mayor parte de curvas se concentren en estos valores del radio.

Tras la observación del gráfico anterior, se han diferenciado varios rangos de valores del radio para los que la RCM se comporta de forma similar. En la figura 7.161 se muestra la representación de la media y la desviación típica de la RCM en cada rango para cada uno de los perfiles estimados.

La mayor diferencia entre los resultados del IHSDM y los del modelo propuesto aparece en los valores extremos del radio: radios reducidos y radios amplios, donde la diferencia llega a ser de más de 10 km/h.

Los valores más altos, tanto de media como de desviación típica, de RCM para el modelo propuesto aparecen para los radios medios, por lo que podría concluirse que es en este rango donde peor comportamiento presenta, subestimando generalmente la velocidad.

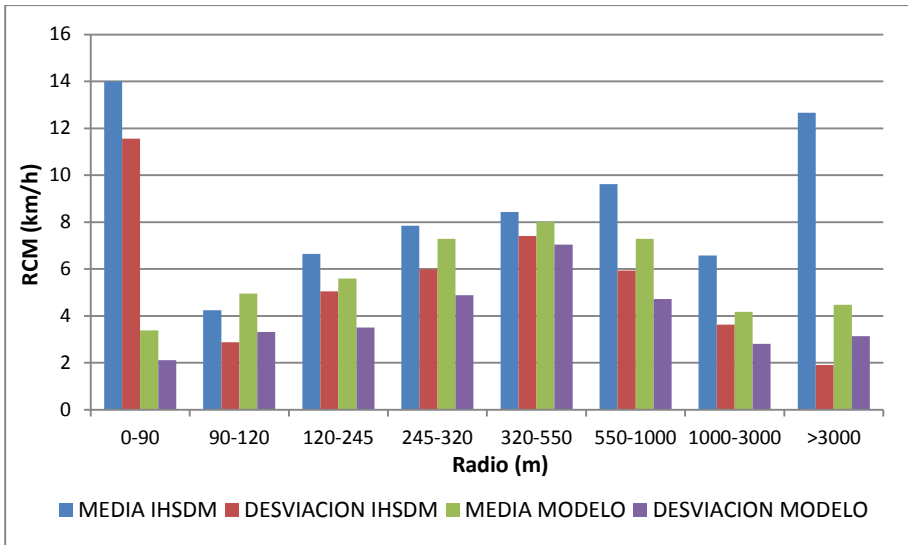


Figura 7.161 Media y desviación típica de la RCM por rangos de radio de la curva circular

Un análisis similar se ha realizado con la relación entre la RCM y la longitud de la curva y el ángulo de deflexión, sin obtener resultados concluyentes.

7.5.3. Análisis del comportamiento del modelo en curvas de transición

Del mismo modo que se ha realizado para las curvas circulares, en este apartado se va a evaluar el comportamiento del modelo para la estimación del perfil continuo de velocidad en carreteras convencionales propuesto en las curvas de transición, es decir, en las clotoides. De esta forma, se obtendrá una aproximación del ajuste del modelo a las aceleraciones y deceleraciones.

No obstante, hay que tener en cuenta que los modelos calibrados, tanto para la aceleración como para la deceleración, no se han llevado a cabo con datos procedentes del perfil correspondiente al percentil 85 de la velocidad sino que se han utilizado los datos individuales de los conductores. Por ello, es muy probable que el perfil estimado a partir del modelo propuesto no se ajuste demasiado al perfil empírico en las zonas de transición.

El procedimiento seguido para la evaluación ha sido similar al que se ha realizado para las curvas circulares. La principal diferencia es, obviamente, que en este caso se ha utilizado la raíz cuadrática media de cada una de las clotoides, calculada a partir de las diferencias entre la velocidad empírica y la velocidad estimada a partir del modelo propuesto y del IHSDM para cada punto de la curva de transición.

En la figura 7.162 se muestra la relación entre la RCM y el radio de la curva. En ella, se observa cómo, a pesar que los modelos propuestos no están basados en el perfil del percentil 85, en general, los errores producidos por el IHSDM son mayores que los producidos por el modelo propuesto, especialmente para los valores extremos de los radios de la curva.

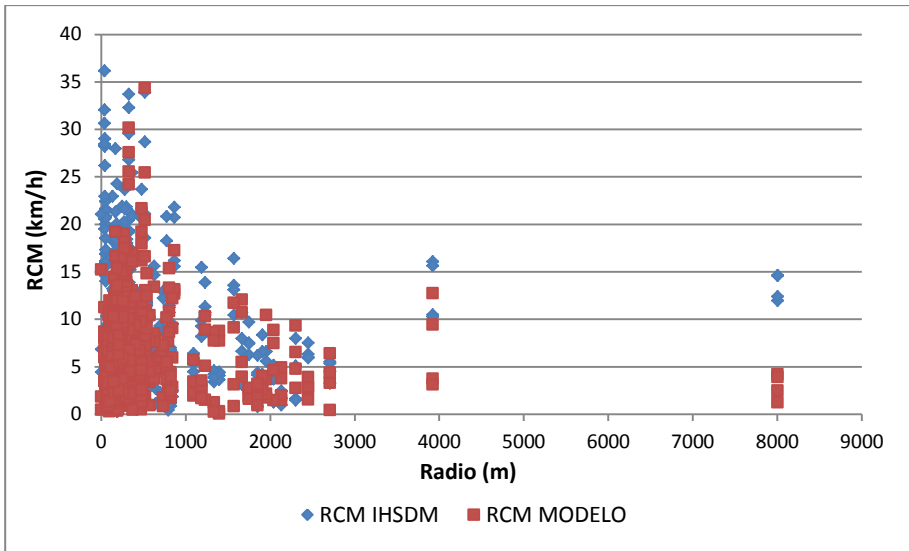


Figura 7.162 RCM de los perfiles estimados de velocidad de operación en clotoides

Como en el caso de las curvas circulares, se han diferenciado varios rangos de valores del radio para los que la RCM se comporta de forma similar y al igual que en ellas rangos de radio en la que no se dispone de datos de curvas.

En la figura 7.163 se muestra la representación de la media y la desviación típica de la RCM en cada rango para cada uno de los perfiles estimados.

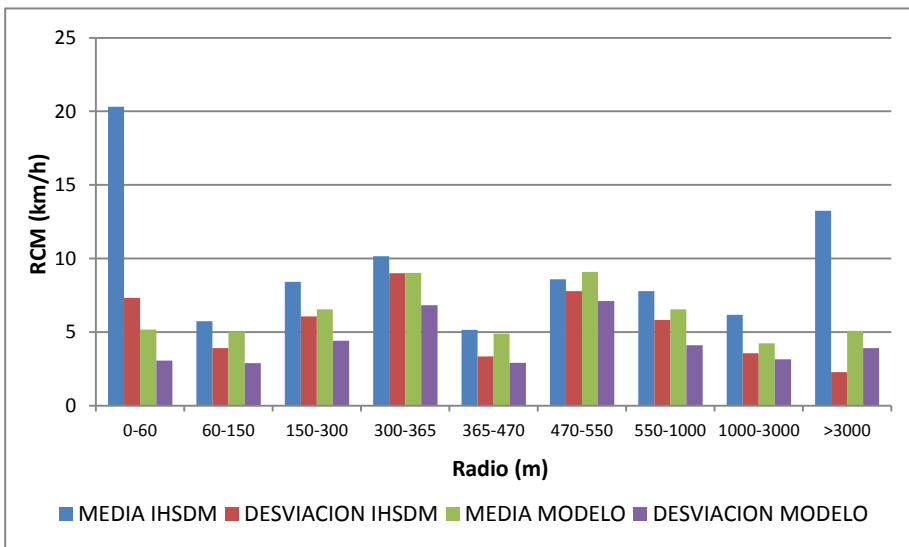


Figura 7.163 Media y desviación típica de la RCM en la clotoide por rangos de radio

Como ya se había observado en la figura 7.162, la mayor diferencia entre los resultados del IHSDM y los del modelo propuesto se produce en los valores extremos del radio, donde la diferencia llega a ser de hasta 15 km/h. Únicamente en el rango de radios entre 470 y 550 metros, la media de la RCM es ligeramente superior en el caso del modelo propuesto.

Gráficas similares se han realizado con la relación entre la RCM y la longitud de la curva y el ángulo de deflexión, sin obtener resultados concluyentes.

7.5.4. Análisis del comportamiento del modelo en rectas

Para la evaluación del comportamiento del modelo para la estimación del perfil continuo de velocidad en carreteras convencionales propuesto en las rectas, se va a seguir un procedimiento similar al llevado a cabo para curvas. Sin embargo, en este caso no se van a considerar todos los puntos que forman parte de las rectas, ya que así se estarían considerando en el análisis también las zonas de aceleración y deceleración. Únicamente se van a incluir en el análisis los puntos que forman parte de los 20 metros centrales de las rectas.

En la figura 7.164 se ha representado la relación con la longitud de la recta de la RCM, calculada para cada recta como la raíz cuadrada del error cuadrático medio resultante de la aplicación del modelo de velocidad de operación recogido en el IHSDM y del modelo propuesto, tomando como base el perfil continuo de velocidad de operación resultante de la toma y tratamiento de los datos, para cada uno de los tramos de estudio. El número de rectas estudiadas ha sido 123.

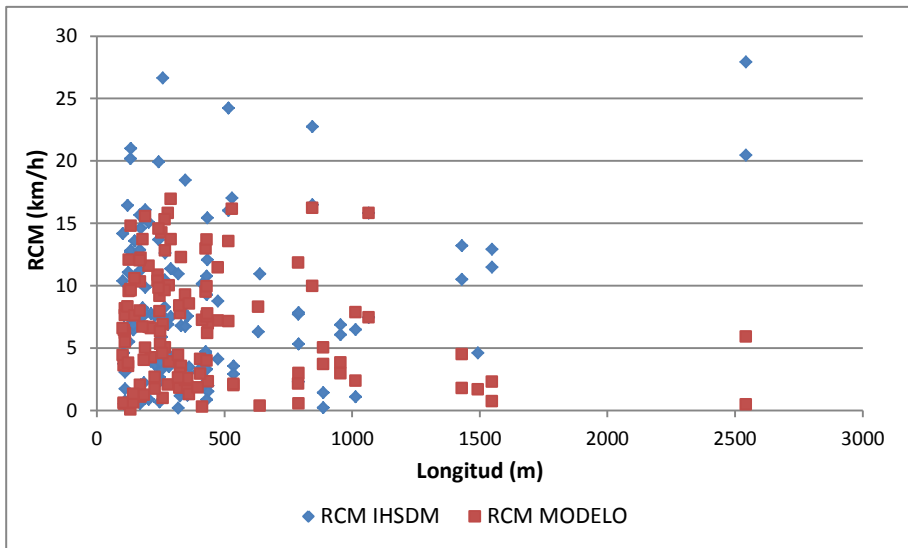


Figura 7.164 RCM de los perfiles estimados de velocidad de operación en rectas

En esta figura se observa cómo, en general, el error producido al utilizar en la estimación de la velocidad el modelo propuesto en el IHSDM es mayor que cuando se utiliza el modelo propuesto en la presente investigación.

A pesar de haber utilizado las 123 rectas de los 10 tramos de carretera estudiados, se aprecia claramente falta de datos para algunos valores de la longitud, por lo que será necesario profundizar en el estudio con una muestra mayor.

Al hacer un análisis por rangos de longitud de la recta, se ha optado por que el primer rango abarque las rectas con longitud inferior a 700 metros, ya que en el modelo propuesto esta era la división adoptada. No obstante, como se observa en la figura 7.165, el comportamiento para rectas de esta longitud y rectas con longitud entre 700 y 1100 metros es muy similar.

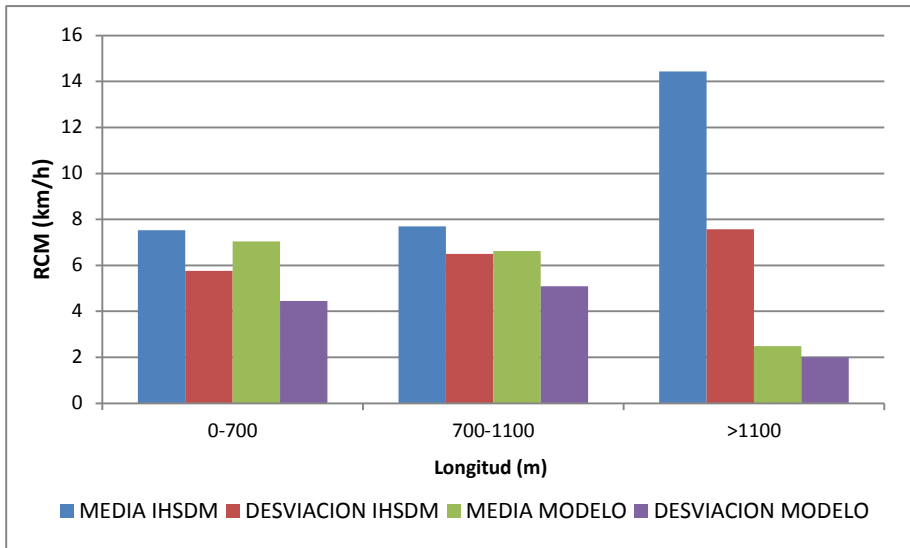


Figura 7.165 Media y desviación típica de la RCM en la recta por rangos de longitud de la misma

En rectas más largas, el modelo del IHSDM presenta un error mayor debido a que les asigna una velocidad deseada de 100 km/h, muy inferior a la que realmente presentan.

Se ha llevado a cabo una evaluación similar comparando la RCM con el radio de la curva anterior y con el parámetro GM, pero no se han obtenido resultados que aporten nuevas conclusiones a las ya descritas.

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 otras investigaciones.

Así, en primer lugar, se realiza una comparación entre la distribución de la velocidad en curvas y en rectas, para comprobar que son claramente diferentes, tanto en los valores de la media como en los de la desviación típica, y que, por tanto, no puede considerarse en los análisis de la consistencia la simple diferencia entre la velocidad de operación en rectas y en curvas.

La velocidad de operación en curvas se ha caracterizado según diferentes parámetros para la calibración de los modelos en investigaciones anteriores, ante la imposibilidad de definir la velocidad mínima en curvas por utilizar únicamente datos puntuales de velocidad. En este apartado se realiza un estudio de los diferentes parámetros y se evalúan las distintas hipótesis utilizadas para el análisis de la velocidad de operación en curvas.

Por otra parte, en algunas investigaciones se ha señalado que la presencia de curvas de transición o su configuración no tiene influencia en la velocidad de operación o en sus variaciones. A lo largo del análisis realizado en el apartado anterior se ha estudiado la relación existente entre las características geométricas de las clotoides y la velocidad de operación y las tasas de deceleración y aceleración. En el presente apartado se analizan estas relaciones.

En cuanto a los fenómenos de deceleración y aceleración, en el presente apartado se comprueba si son válidas algunas de las hipótesis sostenidas en otras investigaciones para su estudio a partir de datos puntuales de velocidad. Estas hipótesis condicionan principalmente la ubicación de los dispositivos de toma de datos.

Por otra parte, se ha estudiado la influencia que la pendiente, como principal característica del perfil longitudinal, tiene sobre la velocidad de operación en curvas y en rectas y sobre las tasas de deceleración y aceleración.

La discusión de los aspectos anteriores puede realizarse en parte gracias a los resultados obtenidos en una fase intermedia del desarrollo del modelo que permite la estimación del perfil continuo de velocidad de operación en tramos de carreteras convencionales. En el apartado anterior se ha llevado a cabo la validación del modelo, comparando, para cada tramo y sentido de carretera estudiado, el perfil continuo de velocidad de operación observado con el estimado a partir de los modelos y reglas constructivas propuestas, así como también con el resultante de aplicar los modelos utilizados por el IHSDM, estudiando en qué rango de valores se ajusta mejor cada uno. En el presente apartado se realizan algunos comentarios sobre la validez del modelo, con base principalmente en esa validación.

Finalmente, a lo largo del análisis se ha estudiado la influencia sobre la elección de la velocidad y de las tasas de deceleración y aceleración de las características del conductor, del viaje que realiza y del vehículo que conduce. En este apartado se van

a estudiar los resultados obtenidos en conjunto, para evaluar si es posible establecer ciertos patrones que determinen los diferentes estilos de conducción.

8.1. LA DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD EN CURVAS VS LA DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD EN RECTAS

La mayoría de las investigaciones anteriores se han basado en el estudio de la velocidad de operación, caracterizada por el percentil 85 de la distribución de velocidad, pero no han realizado un análisis en profundidad de esta distribución.

Generalmente, se procede de esta forma por considerar la velocidad de operación como la máxima velocidad a la que un conductor puede circular en condiciones de comodidad y seguridad. De hecho, se ha comprobado que el aumento del valor de los percentiles de la velocidad conlleva un aumento de la gravedad de los accidentes.

Sin embargo, es importante tener en cuenta también que una mayor dispersión en las velocidades implica mayor número de interacciones entre los vehículos. De ahí que sea interesante estudiar tanto la magnitud como la variabilidad de la velocidad de operación, es decir, que se analice la distribución completa de la velocidad.

Este es uno de los motivos por los que es necesario estudiar y caracterizar la distribución de velocidades y, especialmente, su desviación típica, como se ha realizado en el apartado correspondiente del análisis. Pero, además, se ha llevado a cabo el análisis de la distribución completa de la velocidad en rectas y en curvas para comprobar si pueden ser comparables o no.

En el estudio de los diferenciales de velocidad se ha hecho referencia a que uno de los métodos más utilizados en la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de carreteras se basa en el cálculo de la velocidad de operación tanto en la sección recta como en la curva, para posteriormente hallar la diferencia entre esos valores. Además, se ha citado cómo Hirsh (1987) y McFadden y Elefteriadou (2000) han resaltado en sus estudios que la distribución de velocidades en la curva y en la recta son diferentes y, por tanto, no se debería caracterizar los diferenciales de velocidad en las transiciones recta-curva como la simple diferencia de los valores del perfil de velocidad de operación en la recta y en la curva.

Después del análisis de los datos de la muestra observada, se puede concluir que, efectivamente, como se observa en el ejemplo de la figura 8.1, la distribución de la velocidad es distinta en secciones recta y en secciones curva. En esta figura se ha representado la distribución normal correspondiente a la media y la desviación típica de las velocidades observadas en el punto medio de una curva y una recta del tramo 1 sentido ida del análisis. Este ejemplo muestra claramente cómo tanto la media como la desviación de la distribución de velocidades en rectas es superior a los respectivos valores de la distribución de velocidades en curvas.

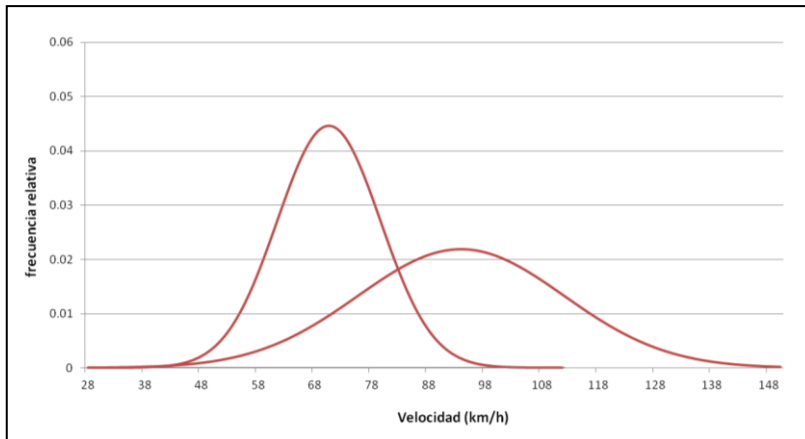


Figura 8.1 Distribución de velocidad en curvas vs distribución de velocidad en rectas

En el resto de casos también se ha comprobado cómo la dispersión de la distribución de velocidades es mucho mayor en las rectas que en las curvas. Mientras que la desviación típica de la distribución de velocidades en las secciones curva estudiadas varía entre 2.78 y 12.8 km/h, la desviación típica en las secciones recta lo hace entre 8.06 y 20.50 km/h.

Además, se ha observado cómo la desviación típica en curvas depende claramente del radio de la curva, aumentando con él hasta un valor aproximado de 500 metros de radio, a partir del cual la desviación típica parece mantenerse más o menos constante con el radio en un valor próximo a 12 km/h. Por su parte, la desviación típica en rectas se mantiene aproximadamente constante con la longitud de la recta en el entorno de 12 km/h, para aumentar considerablemente con la longitud al sobrepasar los 1000 metros.

Estos datos muestran cómo, en curvas de menor radio, el condicionamiento externo al conductor, generalmente por la geometría de la vía, es mucho mayor que en rectas, manteniendo una diferencia de velocidades entre vehículos pequeña. Esta diferencia aumenta en curvas de radio amplio y se hace especialmente significativa para rectas con longitud superior a un kilómetro.

8.2. LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN EN LAS CURVAS CIRCULARES

Generalmente, en la calibración de los modelos para la estimación de la velocidad en curvas circulares a partir de datos de velocidad puntuales se utiliza la velocidad registrada en el punto medio de la curva, considerando que en ese punto se produce la velocidad mínima. Sin embargo, esta hipótesis no puede ser comprobada sin la utilización de perfiles continuos de velocidad.

En el apartado de análisis de este trabajo de investigación se han comparado tres variables diferentes relacionadas con la velocidad en curvas: V85MIN, VMIN85 y V85CTRO, que se corresponden con la velocidad mínima en la curva del perfil de

velocidad del percentil 85, el percentil 85 de las velocidades mínimas presentadas por cada conductor en la curva y el percentil 85 de la velocidad registrada en el centro de la curva, respectivamente.

En este análisis se ha comprobado que:

- No hay diferencias significativas entre V85MIN y VMIN85
- No hay diferencias significativas entre V85MIN y V85CTRO
- No hay diferencias significativas entre VMIN85 y V85CTRO

Por tanto, es correcto asumir que en el centro de la curva se produce la velocidad mínima en la curva.

Asimismo, para la construcción de los perfiles de velocidad de operación y el estudio de las aceleraciones y deceleraciones se considera usualmente velocidad constante a lo largo de las curvas.

En los subapartados del análisis destinados a la evaluación y localización de la deceleración y la aceleración, ya se ha comprobado que en los perfiles de velocidad individuales, e incluso en los perfiles de velocidad de los conductores que se corresponden con el percentil 85 de la deceleración y aceleración, la velocidad es variable en la curva, concentrándose generalmente esta variación en las clotoides.

Esta variación de la velocidad se comentará en los siguientes apartados. En el presente apartado, se evalúa si es correcto considerar constante la velocidad de operación en las curvas circulares.

Para ello, se ha calculado el promedio de la velocidad de operación en las 213 curvas circulares de los tramos estudiados. Para cada curva circular se ha comparado la velocidad de operación en cada punto con la velocidad promedio correspondiente. Tras la comparación de ambas muestras se ha constatado que, con un valor del estadístico t de $2.9372E-8$ y una significación de $0.9999 > 0.05$, no hay diferencias significativas entre ellas. Asimismo, observando el intervalo de confianza para la diferencia de medias, $(-0.0562161, 0.0562161)$, al que pertenece el 0, las medias se pueden considerar iguales.

Por tanto, en general, se puede asumir velocidad de operación constante en las curvas circulares. Además, las diferencias entre la velocidad promedio de cada curva circular y las velocidades en cada punto se encuentran por debajo de los 3 km/h, salvo en el caso de 6 curvas. En ellas, las diferencias aumentan en el inicio o en final de su desarrollo. Estas curvas presentan curvas circulares largas con clotoides adyacentes de reducida longitud, por lo que las aceleraciones y deceleraciones han abarcado parte de la curva circular.

8.3. LA IMPORTANCIA DE LAS CURVAS DE TRANSICIÓN

Las curvas de transición son los elementos geométricos utilizados en el diseño geométrico de carreteras para llevar a cabo el cambio de curvatura entre una alineación recta con curvatura nula y una alineación curva con su curvatura asociada. En España, la curva de transición utilizada para este fin es la clotoide que

varía linealmente su radio desde infinito en la recta hasta el radio de la curva. Este tipo de curvas vienen definidas por la ecuación 102.

$$A^2 = R \cdot L \quad (102)$$

donde:

A : parámetro de la clotoide (m).

R : radio de la curva circular (m).

L : longitud de la clotoide (m).

Esta ecuación es aplicable en cada uno de los puntos de la curva, por tanto el parámetro de la clotoide controlará la forma de esta. En la figura 8.2 se observa cómo, para un mismo radio, una clotoide con un parámetro mayor posee un mayor desarrollo, dando como resultado una transición más suave de la recta a la curva. Por ello, sería factible pensar que la velocidad y la aceleración/deceleración puedan variar en función de cuánto más suave sea esta curva. De hecho, se podría suponer que, gracias a las curvas de transición, el conductor consigue ajustar mejor su trayectoria, reduciendo menos su velocidad.

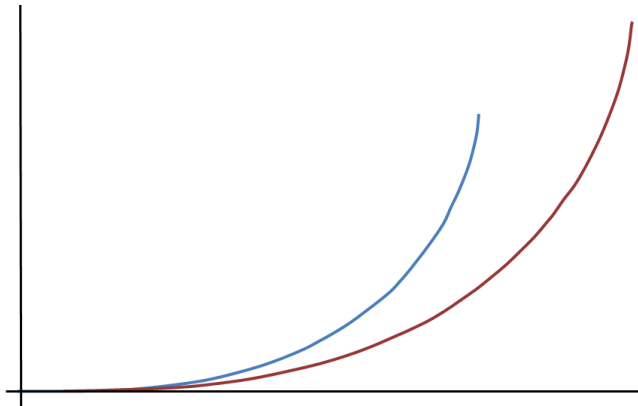


Figura 8.2 Ejemplo de clotoides

Sin embargo, estudios realizados por Passetti y Fambro (1999) indican que la existencia de curvas de transición no produce ningún efecto sobre las velocidades de operación. Por otra parte, Fitzpatrick (2000) afirmó que la velocidad de operación en las curvas sin curvas de transición es ligeramente menor que las velocidades en las curvas con curvas de transición.

En el análisis de los datos realizado en el apartado anterior se ha comprobado que la forma de la clotoide, caracterizada por su parámetro, sí influye tanto en la velocidad desarrollada en la curva como en las tasas de deceleración y aceleración desarrolladas en las transiciones recta-curva y curva-recta. De hecho, se ha modelizado esta relación, dando como resultado ecuaciones que explican un alto porcentaje de la variabilidad de la variable dependiente, llegando a un 73.33 % en el caso de la velocidad en curvas.

En las figuras 8.3, 8.4 y 8.5 se muestran las relaciones entre la velocidad de operación en curvas, la tasa de deceleración y la tasa de aceleración con el parámetro de la clotoide.

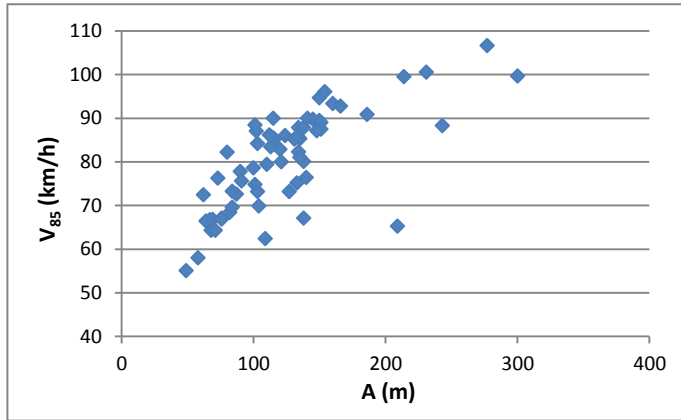


Figura 8.3 Parámetro de la clotoide vs velocidad de operación en curvas

Como puede observarse, al aumentar el parámetro de la clotoide y, por tanto, su desarrollo, la velocidad de la curva es mayor, aproximándose más a la velocidad en las rectas adyacentes. Al realizar esta conclusión hay que tener en cuenta también que, generalmente, curvas de radio mayor llevan asociadas clotoides con parámetro mayor. Por tanto, en esta relación también influye el radio de las curvas, por lo que debería hacerse un estudio en profundidad de este fenómeno.

En cuanto a las tasas de deceleración/aceleración, se observa una disminución clara con el aumento de los parámetros de las clotoides en las que se desarrollan, siendo más suave la deceleración/aceleración cuanto más lo es la curva de transición.

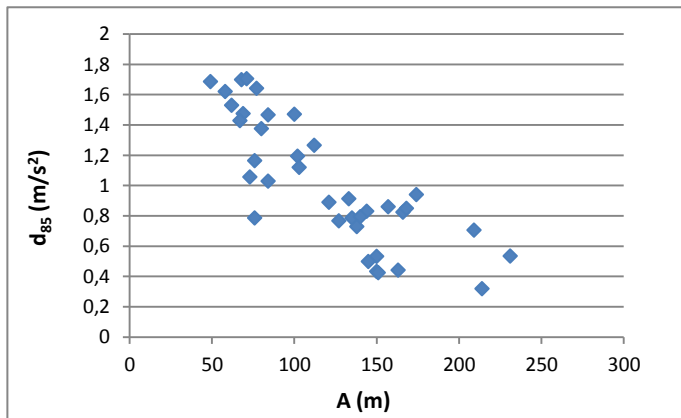


Figura 8.4 Parámetro de la clotoide vs tasa de deceleración

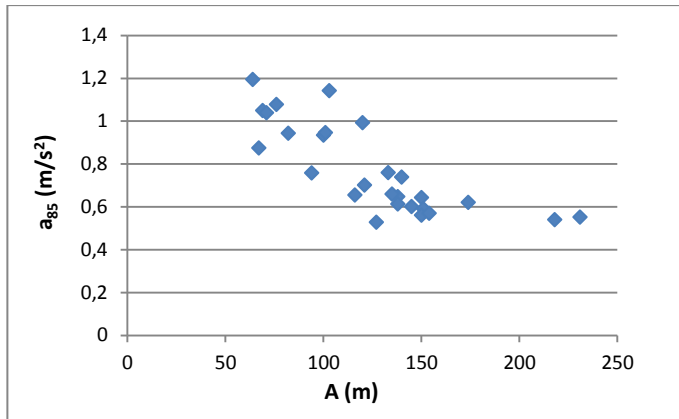


Figura 8.5 Parámetro de la clotoide vs tasa de aceleración

Por tanto, ha quedado comprobado que la configuración de las curvas de transición tienen una importancia esencial tanto en la velocidad desarrollada en las curvas como en las tasas de aceleración y deceleración, aunque se necesita un estudio adicional para profundizar más en el fenómeno. Sin embargo, al no disponer de una muestra significativa de curvas sin clotoides no se puede evaluar la influencia que su existencia presenta en las variables citadas.

8.4. LA DECELERACIÓN Y LA ACELERACIÓN

En la presente investigación, los modelos para la estimación de las tasas de deceleración y aceleración se han calibrado mediante los datos correspondientes al percentil 85 de las tasas de deceleración/aceleración obtenidas de los perfiles de velocidad individuales. De esta forma, se pretende obtener una mejor aproximación al comportamiento de los conductores que la correspondiente al cálculo de la tasa de deceleración/aceleración a partir del perfil de velocidad de operación.

Este nuevo procedimiento ha sido posible gracias a la disponibilidad de un perfil continuo de velocidad para cada uno de los conductores, en los que se ha podido determinar el inicio y el final de la deceleración y aceleración, y las velocidades asociadas.

La mayoría de las investigaciones basan estos cálculos en datos obtenidos en dos secciones puntuales que no tienen por qué corresponderse con los puntos de inicio y final de la deceleración. De hecho, Fitzpatrick et al. (1999) proponen para la estimación de la tasa de aceleración y deceleración su cálculo considerando que tiene lugar en los 200 metros posteriores y anteriores a la curva, respectivamente. Esta aproximación es consistente con la hipótesis de que la velocidad se mantiene constante a lo largo de la curva, sin embargo, no tiene en cuenta la posibilidad de que la aceleración/deceleración se produzca en una longitud diferente o en diferente localización.

Con el fin de estudiar la validez de esta forma de proceder, se han llevado a cabo, a partir de los datos de los perfiles individuales, en todas las transiciones recta-curva consideradas, los siguientes comprobaciones:

- Comprobar si la tasa de deceleración calculada desde 200 metros antes del inicio de la curva hasta el inicio de esta es significativamente diferente de la tasa de deceleración obtenida a partir de los perfiles continuos de velocidad.
- Comprobar si la tasa de deceleración calculada desde 200 metros antes del inicio de la curva hasta el punto medio de esta es significativamente diferente de la tasa de deceleración obtenida a partir de los perfiles continuos de velocidad.
- Comprobar si la tasa de deceleración calculada desde 100 metros antes del inicio de la curva hasta el inicio de esta es significativamente diferente de la tasa de deceleración obtenida a partir de los perfiles continuos de velocidad.
- Comprobar si la tasa de deceleración calculada desde 100 metros antes del inicio de la curva hasta el punto medio de esta es significativamente diferente de la tasa de deceleración obtenida a partir de los perfiles continuos de velocidad.

Con los datos de las trayectorias individuales, para cada transición recta-curva, se ha realizado una prueba t de Student de comparación de muestras correspondientes a cada uno de los ítems anteriores. Los resultados del análisis t han mostrado que las tasas de deceleración obtenidas siguiendo los cuatro procedimientos citados son significativamente diferentes y menores que las obtenidas directamente de los perfiles continuos de velocidad. Esto ocurre en todas las transiciones recta-curva, excepto en el caso de la curva con radio 519 metros, al calcular la tasa de deceleración a partir del punto 100 metros antes de la curva. No obstante, hay que tener en cuenta que esta curva se ha identificado como un dato anómalo en el estudio de las reducciones de velocidad.

Por tanto, se puede concluir que estas formas de proceder dan como resultado unas tasas de deceleración inferiores a las reales.

Un análisis similar se ha realizado en el caso de la aceleración, consistente en las siguientes comprobaciones:

- Comprobar si la tasa de aceleración calculada desde el final de la curva hasta 200 metros después de este punto es significativamente diferente de la tasa de deceleración obtenida a partir de los perfiles continuos de velocidad.
- Comprobar si la tasa de aceleración calculada desde el punto medio de la curva hasta 200 metros después de este punto es significativamente diferente de la tasa de deceleración obtenida a partir de los perfiles continuos de velocidad.
- Comprobar si la tasa de aceleración calculada desde el final de la curva hasta 100 metros después de este punto es significativamente diferente de

la tasa de deceleración obtenida a partir de los perfiles continuos de velocidad.

- Comprobar si la tasa de aceleración calculada desde el punto medio de la curva hasta 100 metros después de este punto es significativamente diferente de la tasa de deceleración obtenida a partir de los perfiles continuos de velocidad.

Los resultados de las pruebas t realizadas han mostrado que en todos los casos la tasa de aceleración calculada a partir de los perfiles continuos de velocidad es mayor a la calculada según los anteriores 4 procedimientos, excepto en el caso de la transición ACC0113 en la que la tasa de aceleración calculada con los datos de velocidad del final de la curva y de 100 metros después ha resultado ser significativamente igual a la tasa de aceleración calculada de los perfiles continuos de velocidad.

Por tanto, tanto en el caso de la aceleración como en el caso de la deceleración, las aproximaciones propuestas por Fitzpatrick et al. (1999) y aplicadas en varios estudios, dan como resultado una subestimación de los valores reales de deceleración y aceleración desarrolladas por los conductores.

8.5. LA INFLUENCIA DE LA PENDIENTE

La pendiente es una de las principales características del perfil longitudinal de una carretera y, en principio, una de las variables que en mayor grado pueden influir en la operación de los vehículos. Por ello, diferentes investigaciones la han incluido en el estudio de la velocidad de operación, tanto en recta como en curva, y de los cambios de esta en las transiciones recta-curva. Su influencia en la aceleración ha sido menos estudiada.

En este apartado se analizan los resultados obtenidos en otros estudios referentes a la influencia de la pendiente en la operación de los vehículos y se comparan con los obtenidos en el presente trabajo de investigación.

8.5.1. La influencia de la pendiente en la velocidad de operación en curvas

La mayoría de las investigaciones relacionadas con la velocidad de operación en curvas y la calibración de modelos para su estimación, o no han estudiado la influencia de la pendiente en ella o no han identificado significancia alguna de su influencia. Este es el caso de Collins et al. (1999) y Fitzpatrick et al. (2000).

Fitzpatrick et al. (2000), basándose en representaciones gráficas de la pendiente de la curva frente a la velocidad de operación, no observaron relaciones directas entre ambas variables para pendientes bajas. Para pendientes altas, aunque no se observó una gran correlación, decidieron incluir la pendiente en el modelo correspondiente.

En este caso, aunque la variable, en su carácter continuo, no ofreció significancia estadística, al separar sus valores en bloques discretos se observó cierta

significancia. De esta forma, concluyeron que la pendiente actúa de la siguiente forma:

- En rampa, la velocidad parece no estar influenciada significativamente hasta pendientes del 4 %. A partir de este valor, la velocidad presenta reducciones considerables.
- En pendiente, no se presenta una diferencia estadística entre pendientes inferiores o superiores a -4 %.

Por otra parte, Schurr et al. (2002) concluyeron que, a medida que la pendiente de aproximación aumenta, la velocidad correspondiente al percentil 85 decrece. Su justificación se basa en que la pendiente influye sobre la mayor parte de los vehículos, debido a su mecánica. Por ello, no se muestra ninguna influencia de la pendiente en el percentil 95 de la velocidad de operación, ya que los conductores que circulan a velocidades superiores al percentil 85 disponen de vehículos más potentes.

En el presente trabajo de investigación, se ha llevado a cabo un análisis de correlación entre la pendiente longitudinal y la velocidad de operación en curvas, dando como resultado los valores que se muestran en la tabla 8.1. En ella se observa cómo la relación entre ambas variables no es significativa, por tener un p-value mayor de 0.05. No obstante, sí que se observa cierta tendencia decreciente de la velocidad con la pendiente. Este resultado es similar al obtenido en otras investigaciones.

Correlación	-0,1276
Muestra	64
p-value	0,3151

Tabla 8.1 Resultados del estudio de correlación V_{85} en curva vs pendiente

Esta débil relación se aprecia también en la representación gráfica de la relación entre ambas variables (figura 8.6).

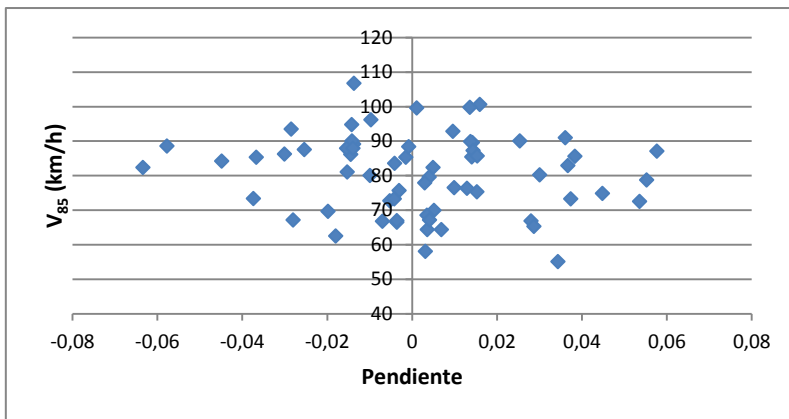


Figura 8.6 V_{85} en la curva vs pendiente

En esta gráfica, al contrario de lo que concluyen los mencionados estudios, no se encuentra una diferencia clara entre la tendencia de la velocidad de operación con pendientes mayores y menores de 4 %. Aún así, hay que tener en cuenta que la muestra de velocidades de operación en curvas con pendiente inferior a -4 % o superiores a 4 % es reducida, por lo que el estudio debería ampliarse con un mayor número de datos en estos dos rangos.

8.5.2. La influencia de la pendiente en la velocidad de operación en rectas

Al igual que en el caso de la velocidad de operación en curvas, los resultados de investigaciones anteriores relacionados con la influencia de la pendiente longitudinal en la velocidad de operación en rectas son muy diversos. Según Polus et al. (2000), el efecto de la pendiente longitudinal no está claro debido a la gran variabilidad de los resultados obtenidos. Según el estudio, sería razonable pensar que las pendientes suaves provocan un aumento de la velocidad de operación, mientras que las pendientes o rampas fuertes actúan de forma inversa, disminuyendo la velocidad de operación.

Por su parte, Fitzpatrick et al. (2000) observaron que las pendientes ascendentes superiores al 4 % presentaban velocidades de operación menores que las comprendidas entre -4 % y 4 %, considerando únicamente los vehículos ligeros.

Figueroa y Tarko (2007) calibraron un modelo para la velocidad de operación en rectas en el que uno de los factores era la pendiente (%), afectada por el coeficiente -0.087. Por tanto, según este estudio la velocidad de operación en rectas disminuye con el aumento de la pendiente.

En el presente trabajo de investigación, se ha llevado a cabo también un estudio de correlación para el estudio de la influencia de la pendiente longitudinal en la velocidad de operación en rectas. Los resultados de este estudio se muestran en la tabla 8.2. En ella se observa que hay cierta tendencia de la velocidad a decrecer con el aumento de la pendiente. Este resultado, que es similar al obtenido por otros estudios, no puede considerarse concluyente al presentar un p-value superior a 0.05, por lo que la relación no es estadísticamente significativa.

Correlación	-0.0892
Muestra	76
p-value	0.4436

Tabla 8.2 Resultados del estudio de correlación V_{85} en recta vs pendiente

La figura 8.7 muestra la representación de la relación entre estas dos variables. En ella, como en el caso anterior, no se aprecia una tendencia clara con los datos estudiados. No obstante, hay que tener en cuenta que el número de datos fuera del rango [-4 %, 4 %] es escaso.

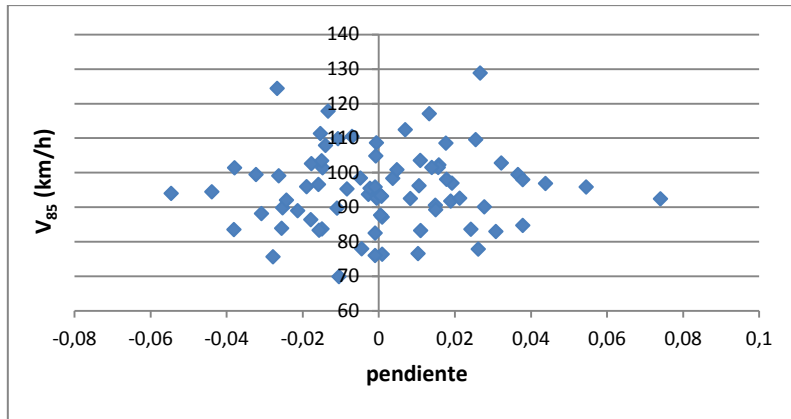


Figura 8.7 V_{85} en la recta vs pendiente

8.5.3. La influencia de la pendiente en los diferenciales de velocidad en las transiciones recta-curva

La influencia de la pendiente en la deceleración o en los decrementos de velocidad en las transiciones recta-curva no ha sido tan estudiada como en los casos anteriores. No obstante, Misaghi y Hassan (2005) calibraron un modelo para la estimación del percentil 85 de los decrementos de velocidad en el que una de las variables era la pendiente, afectada por un coeficiente de +1.30. Por tanto, según los resultados de su estudio, al aumentar la pendiente aumenta los decrementos de velocidad en las transiciones recta-curva.

En el presente trabajo de investigación se ha estudiado la influencia de la pendiente, no sólo en el percentil 85 de los decrementos de velocidad, sino también los decrementos de la velocidad de operación. El estudio de correlación realizado muestra una relación estadísticamente significativa, tanto de la pendiente de la curva cómo de la pendiente de la recta anterior. En ambos casos la tendencia es claramente positiva (tabla 8.3)

		Pdte curva	Pdte recta
ΔV_{85}	Correlación	0.3851	0.37
	Muestra	37	37
	p-value	0.0186	0.0242
$\Delta_{85}V$	Correlación	0.397	0.3866
	Muestra	37	37
	p-value	0.015	0.0181

Tabla 8.3 Resultados del estudio de correlación ΔV_{85} vs pendiente y $\Delta_{85}V$ vs pendiente

En las figuras 8.8 y 8.9 se muestra la tendencia observada en el análisis estadístico para las relaciones entre el $\Delta_{85}V$ y la pendiente de la curva y de la recta anterior.

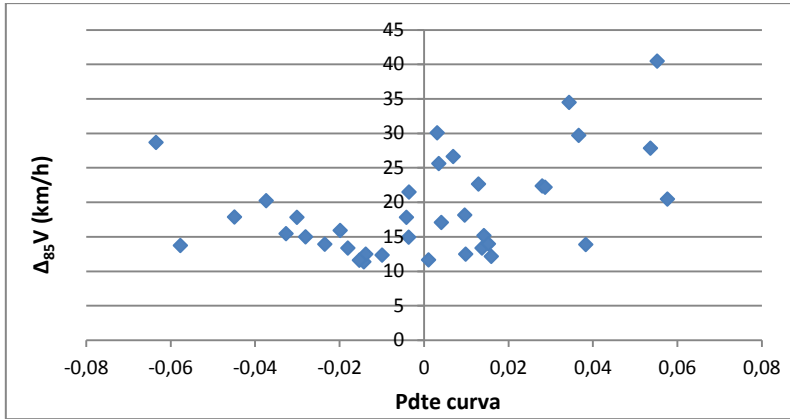


Figura 8.8 $\Delta_{85}V$ vs pendiente curva

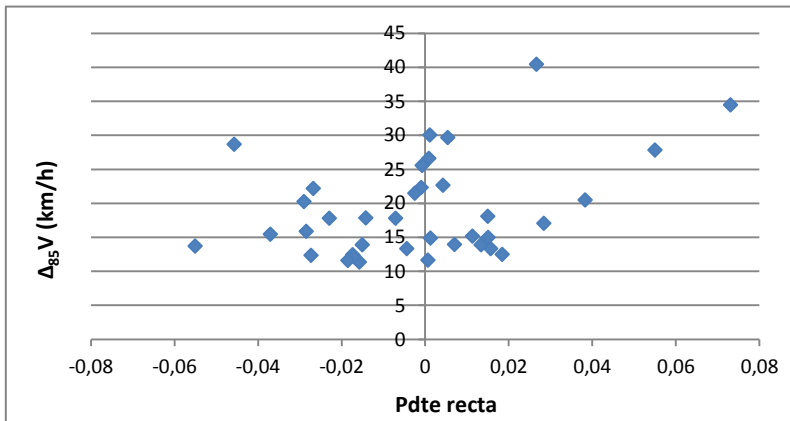


Figura 8.9 $\Delta_{85}V$ vs pendiente recta

El estudio no se ha reducido al análisis de la influencia de la pendiente en los decrementos de velocidad, sino que también se ha analizado la influencia de la pendiente de la curva y de la pendiente de la recta precedente en el percentil 85 de la tasa de deceleración.

En este caso, la relación no ha resultado estadísticamente significativa, a pesar de que la tendencia, al igual que en los casos anteriores, es positiva. Por tanto, según los resultados mostrados en la tabla 8.4, la deceleración tendería a incrementarse al aumentar la pendiente.

	Pdte curva	Pdte recta
Correlación	0.1714	0.2432
Muestra	37	37
p-value	0.3104	0.147

Tabla 8.4 Resultados del estudio de correlación d_{85} vs pendiente

En las figuras 8.10 y 8.11, en las que se han representado las anteriores relaciones únicamente se observa una nube de puntos.

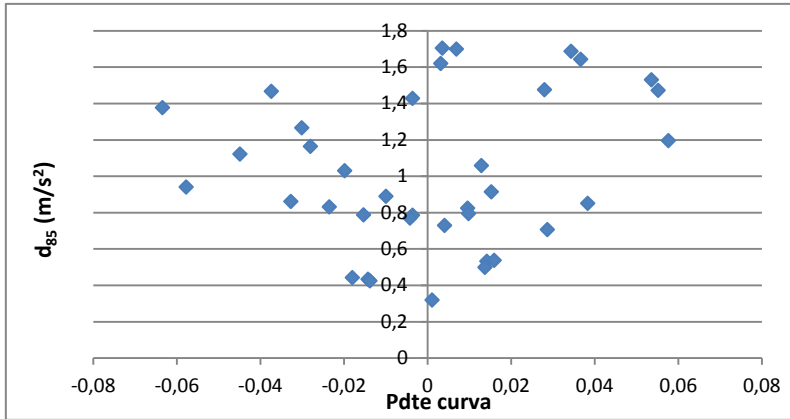


Figura 8.10 d_{85} vs pendiente curva

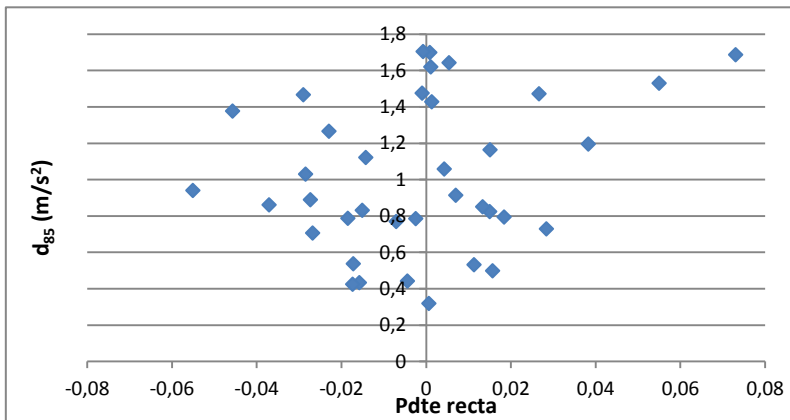


Figura 8.11 d_{85} vs pendiente recta

8.5.4. La influencia de la pendiente en los diferenciales de velocidad en las transiciones curva-recta

Debido a que la influencia de la aceleración en la evaluación de la consistencia es mínima, este parámetro no ha sido estudiado en profundidad en investigaciones anteriores, incluyendo la influencia de la pendiente en él.

En el presente trabajo de investigación, se ha estudiado la influencia de la pendiente de la curva y de la pendiente de la recta en el percentil 85 de la tasa de aceleración.

El análisis de correlación ha mostrado una tendencia negativa entre la pendiente de la curva y la tasa de aceleración, siendo esta relación estadísticamente significativa. Sin embargo, a pesar de que la relación entre la tasa de aceleración y la pendiente

de la recta también ha presentado una tendencia negativa, esta relación no ha resultado estadísticamente significativa (tabla 8.5).

	Pdte curva	Pdte recta
Correlación	-0.4052	-0.2992
Muestra	27	27
p-value	0.036	0.1295

Tabla 8.5 Resultados del estudio de correlación a_{85} vs pendiente

Estas relaciones se han representado en las figuras 8.12 y 8.13.

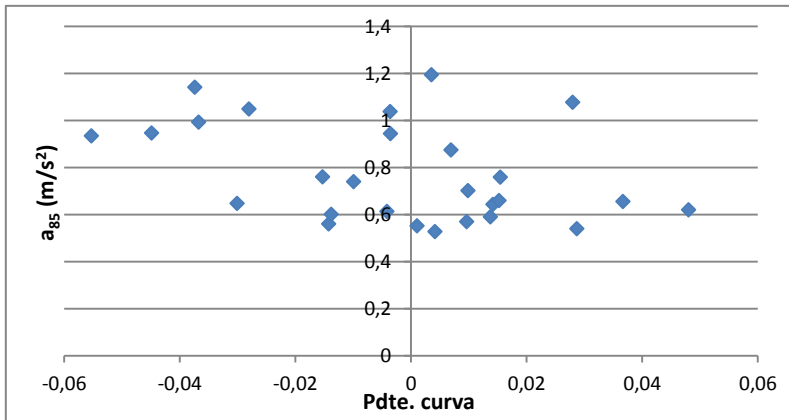


Figura 8.12 a_{85} vs pendiente curva

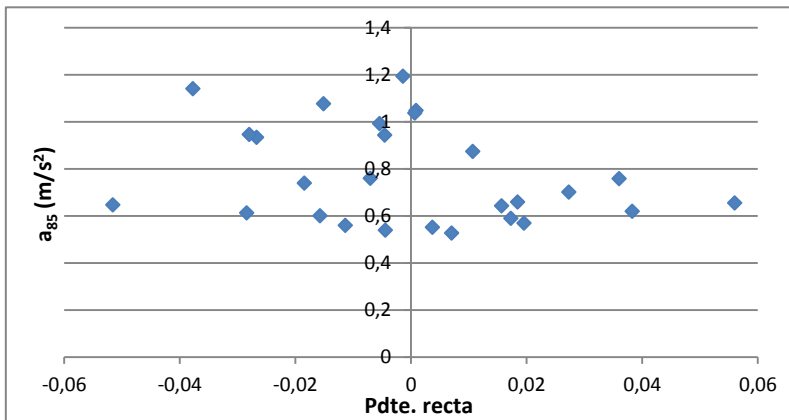


Figura 8.13 a_{85} vs pendiente recta

Los resultados obtenidos pueden explicarse considerando el comportamiento de los conductores y los tipos de vehículos considerados en el estudio. Así, la pendiente longitudinal del tramo de carretera por el que se circula no tiene por qué influir en la

velocidad desarrollada en rectas o en curvas, teniendo en cuenta que se trata de vehículos ligeros. La influencia puede ser considerablemente mayor en el caso de vehículos pesados y, especialmente, en rampas prolongadas, debido a su mayor relación peso/potencia.

Al no haber una influencia significativa en el caso de la velocidad de operación en rectas y en curvas, cabría pensar que tampoco la hay en los diferenciales de velocidad y en la deceleración/aceleración. Sin embargo, sí que se ha observado una relación significativa entre la pendiente y el decremento de velocidad en la transición recta-curva y entre la pendiente y la tasa de aceleración, mientras que no lo ha sido la relación con la deceleración.

Al aumentar la pendiente en la transición recta-curva, la velocidad con la que los conductores circulaban en el tramo recto tiende a disminuir más que para pendientes menores al aproximarse a la curva. Sin embargo, la deceleración no varía, ya que el conductor adecua su longitud de deceleración en función de la velocidad a la que circula en recta y la velocidad que pretende alcanzar en curva, según el tramo recorrido previamente, siendo esta menor a la que alcanzaría con un perfil longitudinal llano al lograr una mayor pérdida de velocidad gracias a que la pendiente de la rampa ayuda a perder velocidad.

Este comportamiento no se corresponde con el observado en la aceleración, que disminuye al aumentar la pendiente de la curva. Para un mismo incremento de velocidad, el vehículo necesita una mayor longitud para alcanzar la velocidad deseada en la recta posterior a la curva, por tanto la aceleración disminuye. Una posible explicación estaría relacionada con que, en cierta forma, se produce una dosificación de la aceleración en el intento de no aumentar en exceso el consumo de combustible.

8.6. RANGO DE VALIDEZ DEL MODELO PROPUESTO

El principal objetivo de la presente investigación ha concluido con el desarrollo de varios modelos que, a partir de las características geométricas de la carretera, permiten estimar la velocidad en curvas y en rectas y las tasas de aceleración y deceleración entre ellas. Asimismo, se han establecido una serie de reglas de construcción en las que se basa la combinación de los citados modelos para la obtención de un perfil continuo de velocidad estimado.

Estos modelos se han calibrado a partir de datos obtenidos en campañas de toma de datos realizadas en 10 tramos de carreteras convencionales. Esto conlleva que la aplicación de los modelos únicamente es válida en este tipo de carreteras, es decir, en carreteras de un carril por sentido de circulación, que no cuenten con las características propias de las vías de alta capacidad. Además, se recomienda que su aplicación en carreteras con pendientes pronunciadas se realice con cautela. Esto es debido a que, a pesar de que se ha estudiado la relación entre las variables dependientes y la pendiente y sólo ha resultado significativa en la modelización de la tasa de aceleración con una aportación mínima a la explicación de la variabilidad, la precisión de los dispositivos GPS en alzado es mucho peor que en planta por lo que

los resultados obtenidos pueden no ser significativos. Para la inclusión de las características del alzado en la velocidad de operación desarrollada por los conductores sería necesario un estudio complementario que abordara esta influencia en profundidad. Además, la muestra de datos para pendientes pronunciadas es reducida.

En cuanto al trazado en planta, en el apartado de validación del modelo ya se ha comprobado cómo hay rangos de valores de radios de curva (320-550 m) en los que el error producido en la estimación es mayor que en el resto de los casos. Sin embargo, este error es inferior al producido al aplicar el modelo propuesto por el IHSDM.

Además, aunque los errores mostrados en curvas de radio amplio (generalmente con ángulos de deflexión reducidos) son reducidos, en estas curvas y en las rectas adyacentes los conductores suelen variar su forma de conducción, describiendo curvas con un radio mayor al de la carretera con el fin de minimizar la disminución de velocidad. Por tanto, a pesar de que el modelo da buenos resultados para las curvas con estas características en los tramos estudiados, como la muestra ha sido bastante reducida, se aconseja completar el estudio con una muestra mayor de curvas de radios amplios y ángulos de deflexión reducidos.

También hay que considerar que la totalidad de las curvas estudiadas presentan 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.

Respecto a las alineaciones rectas, la conclusión es similar a la descrita para curvas. Hay un rango de longitud de recta ($L > 1100$ m) en la que la muestra es muy reducida por lo que, a pesar de que los resultados han sido considerablemente buenos, es necesario llevar a cabo un estudio complementario con un mayor tamaño de muestra. También será necesario completar el estudio de las rectas con una longitud cuyo valor se encuentre en el entorno de los 700 metros, que se ha considerado como el umbral entre los dos modelos calibrados. Este estudio es necesario debido a que en este rango de valores la muestra es reducida y la calibración de los modelos ha presentado una cierta discontinuidad entre ellos.

En la descripción de la toma de datos se han enumerado las características que debían cumplir los tramos de estudio, destacando que no debían tener intersecciones intermedias. Por tanto, los modelos calibrados no serán válidos en los entornos de intersecciones, cuya presencia modifica considerablemente el comportamiento de los conductores.

Por otra parte, en la investigación no se ha considerado la inclusión de vehículos pesados, cuyo comportamiento difiere considerablemente del propio de los vehículos ligeros, entre los que sí que se han incluido pequeñas camionetas, entendidas como camiones de masa máxima autorizada igual o inferior a 3500 kg. En caso de buscar la estimación de la velocidad de operación de vehículos pesados sería necesario llevar a cabo un estudio similar para este tipo de usuarios de la carretera.

Los vehículos participantes que se han incluido en el estudio se encontraban circulando en flujo libre. Por tanto, estos modelos no podrán aplicarse para el estudio de la velocidad desarrollada por vehículos que no se encuentren en estas condiciones.

Finalmente, cabe decir que, como se desprende de la forma de cálculo de los datos de deceleraciones y aceleraciones a partir de los que se han calibrado los correspondientes modelos, este modelo se ha desarrollado con el fin de servir de base para la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de un tramo de carretera y el estudio del comportamiento de los conductores. Por tanto, su utilización en otros ámbitos, como puede ser el estudio de la velocidad de operación en las zonas de transición recta-curva-recta, puede no ser la indicada ya que la velocidad de operación estimada puede ser muy distinta a la real debido a que la calibración está basada en los datos de conductores individuales y no en el propio perfil de operación.

8.7. LA VELOCIDAD Y LA DECELERACIÓN/ACELERACIÓN COMO MEDIDA DEL RIESGO ASUMIDO Y DE LOS ESTILOS DE CONDUCCIÓN

Como se ha descrito en el estado del arte, varios estudios, cuyo objetivo era el estudio del comportamiento de los conductores con relación al riesgo asumido por los mismos y la probabilidad de que se vean involucrados en un accidente, han valorado la idoneidad de varias variables para el mencionado estudio. Entre estas variables destacan la velocidad desarrollada por los conductores y sus aceleraciones y deceleraciones. Con estas variables pretendían caracterizar los diferentes estilos de conducción de los conductores.

Dos de las principales variables son la velocidad máxima, que generalmente se produce en rectas, y la deceleración. Estudios anteriores han concluido que la máxima velocidad registrada de un conductor es una buena medida del estilo de conducción, debido a que una alta velocidad objetivo se traduce en altas fuerzas laterales e incrementa el riesgo de accidente. Otros estudios, han mostrado cómo el comportamiento de los conductores en la deceleración está altamente relacionado con su historial de accidentes.

En el presente estudio se ha evaluado la influencia de las características de los conductores, del viaje que realizan y del tipo de vehículo que conducen en la velocidad desarrollada en curvas y rectas y las tasas de aceleración y deceleración que han presentado. De esta forma, se pretendía distinguir grupos de variables que permitieran caracterizar los diferentes estilos de conducción.

Los resultados de estos análisis se han recogido en las tablas 7.39, 7.60, 7.78 y 7.95, que muestran la influencia de cada una de las características y qué variables son significativas para el análisis. En la tabla 8.1 se muestra un resumen de las citadas tablas. En ella se han eliminado las filas correspondientes a las características geométricas y a las variables que caracterizaban la pertenencia a

cada uno de los tramos. Se muestra en gris, para cada una de las variables dependientes, las variables que no han resultado significativas.

Parámetro	CURVA	RECTA	DECELERACION	ACELERACION
	Estimación	Estimación	Estimación	Estimación
CONSTANTE	64.3831	84.8238	0.628692	0.521377
CONDUCTOR	2.29672	1.62819	0.0272926	-0.0229042
EDAD_21_25	2.31711	1.63074	0.031986	-0.027381
EDAD_26_30	-3.50959	-4.67639	-0.0887323	0.0458842
EDAD_31_35	-4.59376	-6.87095	-0.153442	-0.0291668
EDAD_36_40	-5.64871	-7.42235	-0.0703712	0.00588927
EDAD_41_45	-5.16502	-7.55566	0.00727742	-0.0249202
EDAD_46_50	-5.53175	-7.73889	-0.158029	-0.0364192
EDAD_51_55	-5.48041	-7.48567	-0.0643795	-0.0502254
EDAD_56_60	-7.14459	-9.94117	-0.190031	-0.0903851
EDAD_61_65	-8.76899	-11.6224	-0.236285	-0.0392185
EDAD_66_70	-7.09472	-10.394	-0.090756	-0.0932561
EDAD_71_75	-11.3046	-10.8032	-0.156018	-0.0758155
EDAD_76_80	-13.8931	-16.3158	-0.285804	-0.122882
EDAD_81_90	-13.1296	-22.3943	-0.359671	-0.0571808
KM_POCOS	-1.89482	-1.95004	-0.0474197	-0.0421029
KM_MUCHOS	-0.061395	1.3688	0.0144194	0.0255239
VIAJE_CORTO	-0.219813	-0.647833	-0.0601505	-0.0663838
VIAJE_LARGO	-1.69061	-1.57833	-0.0262153	-0.0526139
VIAJE_RUTA	0.264965	0.300225	-0.0491347	-0.100045
HABITUAL	3.53092	2.83659	-0.0187152	0.0136405
LABORAL	-0.659923	0.0183486	0.0219519	0.0130741
NIÑOS	-0.788384	-1.82116	-0.0397306	-0.0375649
ADULTOS	-1.43408	-1.46614	-0.0661284	-0.0102902
ANCIANOS	-1.72785	-2.05155	0.0378673	0.131457
VH_CAMIONETA	-2.31656	-9.70261	-0.108721	0.0879599
VH_FURGONETA	-2.08844	-4.25345	-0.0685263	-0.0227273
VH_MONOVOL	2.83158	3.05512	0.00379532	-0.0280389
VH_TODOTERR	1.26195	0.63937	-0.042707	-0.0260189

Tabla 8.6 Comparación de variables para la definición de los estilos de conducción

Como se desprende de la observación de la tabla, la velocidad desarrollada en rectas y en curvas puede tener una mejor consideración al pretender explicar los diferentes estilos de conducción que las tasas de aceleración y deceleración, que prácticamente no dependen de ninguna de las variables estudiadas.

En general, el comportamiento de la velocidad desarrollada en rectas y en curvas es muy similar. Los conductores que desarrollan una mayor velocidad en curvas también lo hacen en rectas, aunque las diferencias entre ellos sean menores en curvas que en rectas. Por tanto, se considera que la velocidad desarrollada en rectas es la variable que mejor puede caracterizar los diferentes estilos de conducción.

Por otro lado, en cuanto a la caracterización desarrollada, es importante destacar que en todas ellas se ha obtenido un bajo R^2 , lo que indicaría que se han omitido variables que podrían considerarse clave. Algunas de estas variables son: la relación peso/potencia del vehículo y otras características relacionadas con él; factores relacionados con la seguridad vial, como el uso del cinturón de seguridad; factores

relacionados con la motivación del viaje, como la necesidad de llegar a una hora determinada al destino; factores relacionados con el conocimiento y percepción de los límites de velocidad por parte de los conductores y su actitud frente al riesgo, entre otros.

8.8. LA INFLUENCIA DEL ESTILO DE CONDUCCIÓN EN EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS

En la evaluación llevada a cabo sobre la influencia de las características del conductor, del viaje que realiza y del vehículo que conduce en la velocidad desarrollada se ha comprobado cómo la velocidad disminuye al aumentar la edad del conductor y aumenta al conducir vehículos más ligeros y al realizar un viaje de carácter habitual.

La primera de las conclusiones cobra especial importancia al tener en cuenta que, en los países industrializados el número de personas de avanzada edad está aumentando considerablemente debido a los avances médicos, aumentando también el número de conductores de esta edad. Por ello, cabría preguntarse si el diseño de carreteras actual cubre las necesidades de estas personas.

Los conductores de edad avanzada tienen más riesgo de sufrir un accidente mortal debido a sus limitaciones fisiológicas. Entre estas limitaciones destacan las visuales, ya que la agudeza visual y la amplitud del campo de visión disminuyen con la edad, apareciendo problemas relacionados con la sensibilidad al contraste y el deslumbramiento. Asimismo, con la edad disminuyen los reflejos y las habilidades cognitivas, tales como la memoria y la capacidad de concentración. Por otra parte, estos conductores tienen menos masa muscular, menos flexibilidad y menos resistencia, por lo que aumentan las dificultades para el control adecuado del vehículo.

Todo ello tiene como consecuencia una disminución de sus capacidades de percepción y reacción durante la tarea de conducción. Esta disminución produce aumentos en las distancias de parada, adelantamiento, cruce y orientación, al aumentar el tiempo de percepción y reacción, que cabría considerar a la hora de evaluar el trazado geométrico de una carretera.

Sin embargo, como se ha comprobado en el estudio realizado, al aumentar la edad disminuye considerablemente la velocidad desarrollada por los conductores, con lo que las distancias de parada disminuirían. No obstante, no se tiene constancia de que esta reducción en la velocidad compense la disminución con la edad de las capacidades necesarias para la conducción, por lo que sería necesario llevar a cabo un análisis en profundidad en esta materia en el que se compruebe si el modelo actual de diseño geométrico da como resultado carreteras suficientemente seguras para las personas de edad avanzada.

Por otra parte, del estudio realizado se concluye que la velocidad desarrollada es mayor en los conductores que realizan un viaje de carácter habitual y que conducen vehículos más ligeros, a pesar de que esta diferencia entre conductores es menor

que la debida a la diferencia de edad. Así, existen diferentes estilos de conducción basados en la diferencia de velocidad, variable fundamental en el proceso de diseño geométrico de carreteras. De hecho, la Norma 3.1-IC de Trazado (Ministerio de Fomento, 1999) comienza su capítulo 3 con la frase “el trazado de una carretera se definirá en relación directa con la velocidad a la que se desea que circulen los vehículos en condiciones de comodidad y seguridad aceptables”, de forma que al iniciar el proyecto de una nueva carretera el primer parámetro que se debe fijar es esta velocidad. Para ello, se tienen en cuenta diferentes factores como las condiciones topográficas y del entorno, las consideraciones ambientales, la función de la vía dentro del sistema de transporte, la homogeneidad del itinerario o trayecto, las condiciones económicas, las distancias entre accesos y su tipología.

Sin embargo, no se considera en esta elección el tipo de conductores que van a circular por la nueva carretera, el viaje que realizarán y el vehículo que conducirán, a pesar de que las condiciones de comodidad y seguridad dependen en gran medida de estos factores. De hecho, se ha comprobado en el presente trabajo de investigación que los conductores adaptan su velocidad en función de dichos factores, posiblemente para alcanzar las mencionadas condiciones de comodidad y seguridad. Por tanto, cabría plantear la posibilidad de incluir en el diseño estas variables para la elección de los valores de la velocidad que condicionarán el resto de parámetros asociados.

En el alcance de este objetivo el mayor inconveniente reside en estimar durante la fase de diseño el tipo de conductores que circularán por la carretera a proyectar y la influencia que su consideración tendría en el resto de conductores. Por ejemplo, existen carreteras en las que, ya desde la fase de proyecto, se tiene información relativa a si el tráfico que por ellas va a circular puede considerarse como recurrente o si se trata de tráfico de paso. En ellas, la velocidad como parámetro de diseño podría ajustarse a las características de estos conductores. No obstante, sería necesario estudiar en profundidad qué consecuencias tendría este ajuste en los conductores que no se correspondieran con las características asumidas.

En el caso de la consideración del tipo de vehículo en el diseño geométrico de carreteras, el estudio debería ampliarse a vehículos pesados, ya que son estos los que pueden presentar una mayor diferencia respecto al resto.

9. APLICACIONES PRÁCTICAS

A lo largo de la presente investigación se ha obtenido una serie de resultados que pueden suponer una herramienta complementaria en ciertos ámbitos de aplicación práctica, especialmente en lo que se refiere a ingeniería de carreteras y a seguridad vial.

Estas aplicaciones prácticas, aunque ya se han ido mencionando a lo largo del trabajo presentado, se desarrollan a continuación de forma conjunta.

9.1. APLICACIÓN DE LA RESTITUCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TRAZADO

A lo largo de la investigación se ha desarrollado una metodología para la restitución de la geometría del trazado de un tramo de carretera convencional, basada en los datos procedentes de los dispositivos GPS de 1Hz. Para una adecuada restitución a partir de estos dispositivos, es necesario contar con una muestra suficiente de trayectos debido a su precisión limitada.

Sin embargo, la misma metodología de restitución de la geometría a partir del diagrama de azimut puede aplicarse a datos procedentes de GPS que, debido a su mayor precisión, no precisen más que un recorrido del tramo. Cuando se opte por esta opción se deberá tener en cuenta que el vehículo que realice el recorrido debe hacerlo a una velocidad reducida para obtener el mayor número posible de datos y debe circular lo más centrado posible en el carril.

Asimismo, esta metodología puede aplicarse a cualquier conjunto de datos de geometría que se presenten en función de la longitud y latitud de los puntos que forman el trazado. De esta forma, pueden utilizarse para la restitución tanto los datos de inventario, que disponen algunas de las administraciones competentes de carretera, como, incluso, datos procedentes del clicado en imágenes procedentes de Google Earth. El mejor o peor ajuste a la realidad dependerá, primordialmente, de la fiabilidad de los datos.

Para facilitar la aplicación del método de restitución se cuenta con el programa informático desarrollado en Excel, ya descrito anteriormente, que agiliza enormemente el tratamiento de los datos.

9.2. APLICACIÓN DEL MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN

A lo largo del trabajo de investigación se han calibrado diferentes modelos para la estimación de la velocidad en curvas y en rectas y de las tasas de aceleración y deceleración en las transiciones curva-recta y recta-curva, respectivamente. Asimismo, se han descrito las reglas de construcción necesarias para que, a partir de estos modelos, se estime el perfil de velocidad de operación de un tramo de carretera, a partir de sus características geométricas. El perfil de velocidad estimado

resultante de la aplicación del modelo puede utilizarse tanto en las fases de planeamiento y de proyecto de carretera como en la fase de explotación.

El proceso de diseño de carreteras se basa, principalmente, en el concepto de velocidad de proyecto (o velocidad de diseño), elegida en función de la topografía, el uso del suelo existente y la clasificación funcional de la vía. Con ella se establecen los valores mínimos de las características geométricas de la vía. El diseño resultante debería ser consistente con la velocidad a la que los conductores esperan circular.

La velocidad específica utilizada en el diseño de las curvas horizontales puede suponerse cómo una aproximación a esta velocidad deseada, a pesar de que su correspondencia no es directa.

Con la aplicación de la estimación de la velocidad de operación, a partir del modelo desarrollado, sería posible incluir en el proceso de diseño desde el inicio la velocidad a la que se espera que circulen los conductores.

Además, como ya se ha citado en múltiples ocasiones, el modelo se ha desarrollado con el fin de servir de herramienta en la evaluación de la consistencia del trazado de carreteras convencionales. De hecho, en el caso de las deceleraciones y aceleraciones, la calibración se ha basado en los perfiles individuales de los conductores y no directamente en el perfil de velocidad de operación, con el fin de ajustar lo máximo posible el modelo al comportamiento de ellos.

De esta forma, conocida la geometría de la vía, tanto en la fase de planeamiento y proyecto como en explotación, es posible estimar su velocidad de operación y con base en ella evaluar la consistencia del trazado. Los resultados de esta evaluación mostrarán si existe la necesidad de un rediseño o una adecuación del trazado para la mejora de la seguridad vial.

9.3. APLICACIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA VELOCIDAD DESARROLLADA POR LOS CONDUCTORES

A lo largo del trabajo de investigación se ha caracterizado la velocidad desarrollada por los conductores en tramos curvos y rectos y la deceleración y aceleración desarrolladas en los tramos de transición recta-curva y curva-recta, respectivamente. Esta caracterización, realizada directamente sobre datos desagregados, no está basada únicamente en las características geométricas de la vía, sino también en las características del conductor, en el viaje que realiza y en el vehículo que conduce.

De las cuatro variables dependientes analizadas, en las que se ha detectado una mayor influencia de las características citadas es la velocidad desarrollada, tanto en rectas como en curvas. Las principales conclusiones han sido:

- Los conductores más jóvenes circulan a una velocidad mayor, asumiendo, por tanto, más riesgo que las personas de más edad. La velocidad disminuye progresivamente con el aumento de la edad.
- Los conductores con poca experiencia tienden a desarrollar una velocidad inferior al resto.

- Las personas que realizan un recorrido de forma habitual son más propensas a circular a una velocidad mayor que las personas que no conocen bien la carretera por la que conducen.
- La presencia de pasajeros, especialmente ancianos, produce una disminución de la velocidad desarrollada por los conductores.
- El tipo de vehículo también influye en la velocidad alcanzada por los conductores, debido posiblemente a sus prestaciones.

Estos datos pueden ser una herramienta clave para la comprensión del comportamiento de los conductores en diferentes circunstancias, convirtiéndose así en una buena base para el diseño de programas de educación vial y campañas de concienciación. Con base en estos datos, podrían focalizarse en los aspectos que en mayor medida influyen en el comportamiento de los conductores.

Por otra parte, puede asumirse, según se ha visto en el estado del arte, que las personas que circulan a una velocidad mayor presentan un comportamiento que puede relacionarse con una mayor probabilidad de verse involucrado en un accidente. Por tanto, estos resultados pueden ser utilizados también por las compañías aseguradoras en el desarrollo de sus estrategias comerciales.

10. APLICACIONES METODOLÓGICAS

En el apartado anterior se han descrito los ámbitos en los que se les puede dar una aplicación práctica a los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación. Sin embargo, a lo largo del mismo se han desarrollado también ciertas metodologías de toma de datos y de tratamiento de los mismos que pueden servir como referencia para futuras investigaciones.

10.1. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA RESTITUCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE UN TRAMO DE CARRETERA

En investigaciones anteriores se ha abordado la restitución de la geometría de la carretera mediante diferentes metodologías, basadas generalmente en la aproximación de la geometría en planta a partir de métodos como los esplines cúbicos.

En la presente investigación se propone la utilización del diagrama de azimuts del tramo de carretera para la estimación de la geometría de la misma. Este método permite, de una forma más sencilla, obtener muy buenos resultados, especialmente en lo que al estado de alineaciones se refiere.

Esta metodología no sólo puede aplicarse a una base de datos procedente de dispositivos GPS, sino que puede utilizarse con cualquier base de datos de geometría que se presente en forma de longitud y latitud, que permitan obtener el azimut en cada punto.

La aplicación de la metodología de restitución de la geometría se ha incluido tanto como aplicación práctica como metodológica, ya que, además de poder utilizar la restitución de la geometría en el ámbito de la ingeniería de carreteras como aproximación del trazado de una vía, la metodología utilizada en el tratamiento de los datos abre una nueva vía para la mejora de esta aproximación a nivel metodológico.

10.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TOMA DE DATOS DE VELOCIDAD

En el presente trabajo de investigación se ha desarrollado una nueva metodología de toma de datos de velocidad que permite, a un coste relativamente reducido, la adquisición de perfiles continuos de velocidad de una muestra suficientemente amplia de vehículos en tramos delimitados de carreteras convencionales.

Sin embargo, su aplicación no tiene por qué limitarse al estudio de la velocidad en este tipo de carreteras, sino que, con las adecuadas adaptaciones, puede convertirse en una metodología muy válida de toma de datos en carreteras de varios carriles por sentido de circulación e incluso en tramos de vías urbanas.

Por otra parte, los dispositivos rastreadores pueden entregarse a una muestra de vehículos durante un tiempo prolongado, permitiendo así llevar a cabo una toma de

datos totalmente naturalística, sin necesidad de equipos más costosos y con mayor afección al comportamiento de los conductores.

Además, debido al tamaño y facilidad de montaje de los dispositivos GPS, la toma de datos no necesariamente tiene que realizarse únicamente en vehículos ligeros. Sin ningún dispositivo adicional ni adaptación, los GPS utilizados pueden emplearse en el registro de velocidad de vehículos pesados, vehículos de emergencias, autobuses, motocicletas, bicicletas e incluso peatones.

10.3. RECOMENDACIONES PARA EL POSICIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS DE TOMA DE DATOS PUNTUAL DE VELOCIDAD

La mejor metodología de toma de datos para la evaluación de la velocidad desarrollada por los conductores en carretera y, especialmente, para el estudio, caracterización y modelización de los fenómenos de deceleración y aceleración, se basa en la obtención de perfiles continuos de velocidad de una muestra significativa de conductores.

Sin embargo, la implantación de esta metodología de toma de datos no es siempre posible. Las investigaciones basadas en toma de datos puntuales de velocidad ubican los dispositivos de registro de velocidades en las zonas donde intuyen que se va a producir la velocidad mínima en curva, la velocidad completamente desarrollada en rectas y donde se encuentra el inicio y el final de la aceleración/deceleración. Pero no pueden comprobar que sus hipótesis sean ciertas.

Por ello, en este apartado se analiza dónde ubicar los dispositivos de toma de datos de velocidad puntuales para la obtención de datos que den resultados próximos a los reales.

En cuanto al análisis de la velocidad desarrollada en las curvas circulares, se puede asumir constante en toda su longitud e igual a la velocidad en el centro de esta, como se ha comprobado anteriormente. Por tanto, se recomienda la localización de un dispositivo de registro de velocidad en el centro de la curva circular.

Para la evaluación de la velocidad desarrollada en rectas, se recomienda la ubicación del dispositivo de toma de datos en el centro de la recta, con el fin de intentar registrar velocidades fuera de las zonas de aceleración y deceleración. No obstante, esta situación únicamente podrá asegurarse en rectas suficientemente largas, ya que en rectas cortas las zonas de aceleración y deceleración abarcarán toda su longitud, no dejando que la velocidad en rectas llegue a desarrollarse en toda su magnitud. En el estudio realizado se ha comprobado que en las rectas en las que la suma de la longitud de la misma y de la longitud de las clotoideas adyacentes es inferior a 100 metros los tramos de aceleración y deceleración abarcan todo su desarrollo. En rectas con esta longitud superior, el tramo abarcado por la aceleración y deceleración depende de los radios de las curvas adyacentes.

Para determinar dónde ubicar los dispositivos de toma de datos que permitan determinar las tasas de aceleración y deceleración con la mayor aproximación posible a las reales, se han realizado cuatro análisis diferentes: determinación de la

localización del punto de inicio de la deceleración en recta, punto final de la deceleración en la curva, punto de inicio de la aceleración en la curva y el punto final de la aceleración en la recta posterior.

Para la determinación de la localización del punto de inicio de la deceleración se comprueba, para cada una de las transiciones recta-curva evaluadas y para cada conductor, si el punto kilométrico correspondiente al inicio de la deceleración es significativamente diferente al punto kilométrico situado a diferentes distancias del inicio de la primera clotoide.

Los resultados de las pruebas t de Student en las que se han comparado las muestras citadas han mostrado que el punto kilométrico del inicio de la deceleración es significativamente mayor que el punto situado 100 metros antes del inicio de la clotoide y significativamente menor que el punto situado 50 metros antes del final de la recta. Además, el punto kilométrico del inicio de la deceleración ha resultado no ser significativamente diferente del punto situado 70 metros antes del inicio de la clotoide.

Por tanto, en el caso de disponer únicamente de toma de datos de velocidad puntual, se recomienda ubicar el dispositivo que mida la velocidad en el punto de inicio de la deceleración 70 metros antes del final de la recta anterior a la curva.

Un análisis similar se ha realizado para la determinación de la ubicación del punto final de la deceleración. El objetivo ha sido comparar este punto con los puntos singulares de la transición recta-curva. Se han desarrollado siete pruebas diferentes:

- a) Comprobar si el punto final de la deceleración es significativamente diferente del inicio de la primera curva de transición.
- b) Comprobar si el punto final de la deceleración es significativamente diferente del punto medio de la primera curva de transición.
- c) Comprobar si el punto final de la deceleración es significativamente diferente del inicio de la curva circular.
- d) Comprobar si el punto final de la deceleración es significativamente diferente del punto medio de la curva circular.
- e) Comprobar si el punto final de la deceleración es significativamente diferente del final de la curva circular.

Se han llevado a cabo estas comprobaciones mediante pruebas t considerando los perfiles individuales de cada una de las transiciones recta-curva. Se han obtenido las siguientes conclusiones:

- La diferencia de la localización entre el punto final de la deceleración y el punto medio de la curva es estadísticamente diferente de 0 metros, lo que indica que desde un punto de vista estadístico, están localizados en puntos distintos. Por tanto, las investigaciones en las que el fenómeno de la deceleración se basan en la toma de datos en el punto medio de la curva no se ajustan adecuadamente a la realidad.
- La diferencia de la localización entre el punto final de la deceleración y punto de inicio de la curva de transición es significativamente positiva. La misma conclusión se ha observado en la comparación entre el punto final

de la deceleración y el punto medio de la curva de transición. Además, las diferencias en la localización entre el punto final de la deceleración y el principio de la curva circular, el punto medio y el punto final de esta, son significativamente negativas. De esto se puede concluir que el final de la deceleración aparece en la segunda mitad de la curva de transición.

Por tanto, en caso de disponer únicamente de datos puntuales de velocidad, se aconseja ubicar el dispositivo de toma de datos entre el punto medio de la curva de transición y el inicio de la curva circular, para la caracterización de la velocidad en el punto final de la deceleración.

Sin embargo, en ambos estudios las desviaciones típicas de las diferencias evaluadas han presentado valores considerablemente altos. Este resultado indica que, considerando todas las trayectorias, aunque el comportamiento medio puede asumirse similar entre los puntos propuestos para la toma de datos puntuales de velocidad y los puntos reales de inicio y final de deceleración, hay una gran dispersión. Por tanto, los resultados pueden no ajustarse adecuadamente a la realidad, con lo que siempre es preferible disponer de datos continuos de velocidad en el estudio del fenómeno de la deceleración entre recta y curva.

Un análisis similar se ha llevado a cabo para la propuesta de la localización de la toma de datos de velocidad puntual que permita la caracterización del fenómeno de la aceleración en la transición curva-recta.

Como resultado del análisis de las diferencias entre la localización del punto inicial de la aceleración y los puntos singulares de la transición curva-recta, se ha concluido que el punto de inicio de la aceleración es significativamente superior al final de la curva circular y significativamente inferior al punto medio de la clotoide posterior. Por tanto, se recomienda que la toma de datos de velocidad que caracterice el punto inicial de la aceleración se ubique en la primera mitad de la clotoide posterior a la curva circular.

Se ha evaluado también la localización del punto final de la aceleración, concluyendo que la localización de este punto y del punto situado 100 metros después del inicio de la recta son significativamente iguales.

Por tanto, para el estudio y caracterización de la aceleración en la transición curva-recta se recomienda ubicar los dispositivos de toma de datos en la primera mitad de la clotoide posterior a la curva circular y 100 metros dentro de la recta. Sin embargo, como en el caso de la deceleración, la desviación típica de las diferencias analizadas es muy alta, pudiendo llegar a 74 metros en el caso del punto inicial y 130 metros en el caso del punto final de la aceleración. Por tanto, a pesar de estas recomendaciones, en el estudio de los fenómenos de la aceleración y deceleración se aconseja la utilización de datos continuos de velocidad en lugar de datos puntuales.

Por otro lado, si, aún teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se opta por la toma de datos puntuales de velocidad, se recomienda la identificación de los sucesivos valores de velocidad para cada uno de los vehículos. De esta forma, se

facilitaría el estudio individual de los conductores mediante el análisis de los datos desagregados, no restringiéndolo únicamente a los datos agregados en percentiles.

11. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La metodología desarrollada en el presente trabajo de investigación y los resultados obtenidos de su aplicación pueden convertirse en una herramienta fundamental para el estudio de la seguridad vial, tanto de los trazados en la fase de diseño como de las 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 del comportamiento de los conductores.

Además, esta metodología permite también realizar otro tipo de investigaciones que de otra forma habrían sido imposibles o los resultados no habrían sido del todo ajustados. Con ello, se abren nuevas líneas de investigación.

La restitución de la geometría del trazado

Con la metodología propuesta se consigue una buena estimación de la geometría del trazado de la carretera. El inconveniente es que la intervención del usuario es primordial para la obtención de buenos resultados, especialmente en tramos de geometría complicada, como los casos de curvas de dos radios.

El proceso de restitución de la geometría en planta del trazado se encuentra actualmente en desarrollo, mejorando el proceso a partir del ajuste del diagrama de azimuts mediante figuras geométricas, como la parábola en el caso de la variación del azimut en las clotoides y de rectas en el caso de rectas y curvas. Entre ellas se imponen ciertas condiciones de continuidad en sus límites, permitiendo, mediante la aplicación informática desarrollada, obtener el mejor ajuste al diagrama. Una vez delimitadas las diferentes zonas del diagrama, la obtención del estado de alineaciones es directa. De esta forma, la intervención del usuario es menos determinante ya que la aplicación obtiene el mejor ajuste entre dos puntos seleccionados.

Por otra parte, con la misma base anterior, se está desarrollando la metodología para la obtención de la geometría en alzado, ajustando el perfil longitudinal mediante rectas y parábolas que dan lugar a rasantes y a acuerdos.

Mejora de los modelos desarrollados para carreteras convencionales

En el presente trabajo de investigación se han obtenido una serie de modelos de estimación de la velocidad de operación en rectas y en curvas y de las tasas de aceleración y deceleración en las transiciones curva-recta y recta-curva, respectivamente. En la calibración de los mismos se ha incluido la pendiente longitudinal de la alineación como único parámetro del trazado en alzado, no resultando significativa. Por lo que los modelos únicamente dependen de las características geométricas del trazado en planta.

Con la mejora de la restitución de la geometría en alzado, podrán introducirse en el análisis los diferentes parámetros que la caracterizan. Así será posible estudiar el

comportamiento de los conductores en función de la geometría en planta, de la geometría en alzado y de la combinación o coordinación de ambas.

Por otra parte, como se ha comentado en el desarrollo de los modelos propuestos, hay ciertas configuraciones que no están adecuadamente recogidas en la base de datos en la que se ha basado la calibración. Así, se ha observado cómo en el caso de las curvas hay una falta de muestra de curvas circulares con radio superior a 300 metros y en el caso de las rectas la muestra utilizada de rectas con una amplia longitud es mínima. Por tanto, será necesario mejorar los modelos con la incorporación de nuevos datos de alineaciones con estas características.

Además, se ha comprobado que las combinaciones entre curvas y rectas en las que las alineaciones curvas presentan un radio amplio y un bajo ángulo de deflexión, no presentan un comportamiento asimilable al resto de combinaciones. Por ello, a pesar de que en la validación del modelo propuesto se ha comprobado que el ajuste en ellas es aceptable tras ciertas modificaciones, es necesario llevar a cabo un estudio en profundidad del comportamiento de los conductores en estas zonas, ya que es previsible que la geometría de las trazadas sea más suave que la de la curva.

Finalmente, en el desarrollo de los modelos, únicamente se han considerado las aceleraciones y deceleraciones que se producen entre rectas y curvas, asumiendo estas mismas tasas en el caso de curvas consecutivas. Para una mejor aproximación del modelo al comportamiento real se precisa un estudio complementario de las diferentes combinaciones de curvas que pueden presentarse en un trazado de carretera.

Estudios y modelizaciones en otros tipos de carreteras

En este trabajo de investigación se ha aplicado la metodología a tramos de carreteras convencionales con un carril para cada sentido de circulación. Sin embargo, con pequeñas modificaciones en la metodología se pueden obtener también datos en carreteras de calzadas separadas y con más de un carril de circulación.

Asimismo, se pueden obtener datos en carreteras con distintas intersecciones con el fin de evaluar su influencia sobre la velocidad y la deceleración/aceleración de los vehículos.

Esto mismo puede evaluarse en tramos urbanos con distintos moderadores de tráfico, permitiendo estudiar su funcionalidad y su efecto sobre los usuarios, realizando estudios antes – después.

Estudio de las velocidades de operación de otro tipo de vehículo

En la metodología presentada únicamente se ha mencionado su aplicabilidad a vehículos ligeros, sin embargo también puede aplicarse a otros usuarios de la vía.

El comportamiento de los conductores, caracterizado por la velocidad y las tasas de aceleración y deceleración desarrolladas por ellos, difiere considerablemente en función de si conducen un vehículo ligero u otro tipo, como pueden ser vehículos pesados o motocicletas.

La misma metodología de toma de datos y de tratamiento de los mismos que se ha desarrollado en este trabajo de investigación puede llevarse a cabo en estos vehículos, caracterizando así el comportamiento de sus conductores.

Asimismo, puede distribuirse una muestra de dispositivos GPS entre diferentes conductores de vehículos ligeros, pesados, motocicletas o incluso emergencias y autobuses, y tras unos días de toma de datos evaluar los datos registrados. De esta forma, es posible disponer de datos totalmente naturalísticos de amplios tramos de carretera y de vías urbanas.

Para llevar a cabo estas investigaciones será necesario definir adecuadamente el diseño experimental y los pasos a seguir en el tratamiento de datos ya que, sin ciertas adecuaciones, no podrían calcularse parámetros como la velocidad de operación. Sin embargo, con la simple incorporación de una pequeña cámara que registre las condiciones del tráfico, se podría relacionar fácilmente el comportamiento del conductor con estas.

Estudio de la movilidad de usuarios vulnerables

Siguiendo un proceso similar al anterior pero distribuyendo los dispositivos GPS entre una muestra significativa de peatones o bicicletas, podría obtenerse de forma sencilla una caracterización de la movilidad de los usuarios vulnerables en un municipio, por ejemplo.

Calibración de un nuevo criterio de consistencia

El estudio de los perfiles continuos de velocidad correlacionados con la accidentalidad detectada en distintos tramos de carretera y con los diferentes factores que pueden influir en ella, pueden ser la base del ajuste y de la calibración de los criterios existentes utilizados en la evaluación de la consistencia del diseño geométrico, de forma que se ajusten mejor a las características de las carreteras españolas y al comportamiento de sus usuarios.

Asimismo, los perfiles continuos de velocidad pueden utilizarse incluso en el desarrollo, calibración y validación de algún nuevo criterio para la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de las carreteras españolas.

Profundización en el estudio del comportamiento de los conductores

A lo largo del trabajo de investigación se ha estudiado la influencia de las características de los conductores, del viaje que realizan y del tipo de vehículo que conducen en las velocidades desarrolladas por ellos en rectas y en curvas y en las tasas de aceleración y deceleración que han presentado.

A partir de los datos disponibles, puede llevarse a cabo una investigación centrada en la estabilidad en la elección de la velocidad por parte de los conductores entre elementos consecutivos. Además, con una ampliación de la campaña de toma de datos se podría caracterizar también la estabilidad de la elección en el tiempo, evaluando las velocidades desarrolladas por un mismo conductor, en un mismo tramo de carretera, pero en momentos o días distintos.

Por otra parte, al disponer de la matrícula de los vehículos de los que se han registrado datos de velocidad, con la colaboración de la Dirección General de Tráfico o de la administración competente en el acceso a datos relacionados con el historial de sanciones y accidentes, se podrían relacionar estos datos con el perfil de velocidad desarrollado. De esta forma, se podrían estudiar los diferentes comportamientos que presentan una mayor probabilidad de verse involucrados en un accidente.

Asimismo, a partir de los datos de matrícula de los vehículos involucrados en el estudio, se podría acceder a los datos de la ficha técnica del vehículo y relacionar los datos que en ella se encuentran con el perfil de velocidad registrado. De esta forma, se podría llevar a cabo un estudio en profundidad de la influencia de variables como la relación peso/potencia en el perfil de velocidad desarrollado.

Finalmente, con un estudio en profundidad basado en datos obtenidos según la metodología propuesta, sería posible llevar a cabo una evaluación de la influencia del estilo de conducción en la seguridad vial. Asimismo, se podría analizar la relación de estos con el diseño geométrico de carreteras y cómo se podría influir en ellos para una mejora en la eficiencia energética y ambiental.

12. CONCLUSIONES

La evaluación de la consistencia del diseño geométrico de una carretera es la principal herramienta para el estudio y mejora de la seguridad vial del mismo. Una baja consistencia del diseño geométrico 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.

Los criterios más comúnmente utilizados para su evaluación están basados en el estudio de diferentes parámetros relacionados con la velocidad de operación, identificada como el percentil 85 de la distribución de velocidades obtenida de vehículos ligeros circulando en condiciones de flujo libre en un tramo de carretera. El perfil de velocidad de operación puede obtenerse a partir de mediciones durante la fase de explotación de la carretera. Sin embargo, tanto en la fase de planeamiento como en la de proyecto, únicamente puede estimarse.

Por ello, el principal objetivo de este trabajo de investigación ha sido el desarrollo de un modelo que permita estimar el perfil de velocidad de operación de un tramo de carretera convencional, en función de las características geométricas de su trazado. Durante el estudio de los diferentes parámetros involucrados se han obtenido resultados intermedios que pueden considerarse resultados finales en sí mismos.

Este trabajo de investigación presenta una nueva metodología de toma de datos que permite la restitución de la geometría de la vía y la obtención de perfiles continuos de velocidad, a partir de los datos de localización obtenidos de dispositivos rastreadores GPS. La utilización de estos dispositivos supone un avance considerable en los dos ámbitos.

Utilizando dispositivos GPS de seguimiento pasivo con cadencia de toma de datos de 1 segundo y seleccionando una muestra suficiente de vehículos realizando el mismo recorrido en ambos sentidos de un tramo de vía, es posible calcular la trayectoria media desarrollada por ellos para, a partir de ella, obtener una estimación de la geometría del trazado de la vía.

Para llevar a cabo esta estimación se han propuesto dos metodologías distintas, una basada en el diagrama de curvaturas bruto y otra en el diagrama de azimuts bruto. Después de un análisis comparativo entre ambas formas de proceder, se ha concluido que es la segunda de ellas la que presenta mejores resultados.

Como se ha comentado, esta estimación se realiza con base en el diagrama de azimuts asociado, en el que se distingue claramente las diferentes alineaciones. A partir de su estudio y ajuste, se obtiene de forma relativamente sencilla y con un bajo coste, el estado de alineaciones del tramo. Para ello, se identifican como rectas las zonas del diagrama con azimut constante, las curvas con las zonas con azimut variable linealmente y las curvas de transición con las zonas en las que el azimut varía de forma no lineal.

Esta metodología de restitución de la geometría de la vía, basada en el diagrama de azimuts, no sólo puede aplicarse a datos procedentes de una toma de datos similar a la desarrollada en la presente investigación, sino que puede aplicarse a cualquier

conjunto de datos de geometría que se presenten en función de la longitud y latitud de los puntos que forman el trazado o de sus coordenadas.

Durante la misma toma de datos, se obtienen los perfiles individuales de velocidad de cada uno de los vehículos con los que estudiar la distribución de la velocidad desarrollada y, concretamente, la velocidad de operación, considerada como el percentil 85 de ella.

Durante este trabajo de investigación, se han llevado a cabo diez jornadas de toma de datos en las que se han registrado datos de una muestra suficiente de vehículos circulando por 10 tramos de carreteras convencionales (ambos sentidos de circulación), incluyendo secciones curva, tramos rectos y zonas de transición recta-curva y curva-recta de diferentes características. Aplicando la metodología descrita, se han obtenido para cada uno de los tramos de carretera, el estado de alineaciones, los distintos perfiles continuos de velocidad individuales y los perfiles correspondientes a los sucesivos percentiles de la velocidad, así como también la media y la desviación típica de la distribución de la velocidad en cada punto.

Durante el estudio de la distribución de la velocidad en rectas y en curvas, se ha constatado que la distribución observada en ellas es distinta y que la desviación típica y, por tanto, la dispersión de las velocidades, en rectas es mucho mayor que en curvas.

Para completar el estudio de la distribución de la velocidad desarrollada por los conductores en rectas y en curvas, y para permitir su estimación en función de las características geométricas de la vía, se ha calibrado un modelo para la estimación de la media y la desviación típica en curvas y en rectas.

Las ecuaciones 103 y 104 definen los modelos para la estimación de la media y la desviación típica de la velocidad en las secciones curvas, explicando un 53.87 % y un 35.14 % de la variabilidad de la media y de la desviación, respectivamente.

$$V_{M_C} = \sqrt{-7619.89 + 2420.63 \cdot \ln(R)} \quad (103)$$

$$\sigma_{V_C} = \sqrt{14.8194 + 5.38444 \cdot \sqrt{R}} \quad (104)$$

donde:

V_{M_C} : media de la distribución de la velocidad en curvas (km/h).

σ_{V_C} : desviación típica de la distribución de la velocidad en curvas (km/h).

R : radio de la curva circular (m).

En el caso de los tramos rectos, las ecuaciones 105 y 106 definen los modelos para la estimación de la media y la desviación típica de la velocidad. Estos modelos han presentado un R^2 de 37.11 % y de 63.40 %, respectivamente.

$$V_{M_R} = \sqrt{5726.48 + 1.79155 \cdot (L + L_{CL1_2} + L_{CL2_1})} \quad (105)$$

$$\sigma_{V_R} = \sqrt{124.982 + 0.000046576 \cdot L^2} \quad (106)$$

donde:

V_{M_R} : media de la distribución de la velocidad en rectas (km/h).

σ_{V_R} : desviación típica de la distribución de la velocidad en rectas (km/h).

L : longitud de la recta (m).

L_{CL1_2} : longitud de la clotoide anterior a la recta (m).

L_{CL2_1} : longitud de la clotoide posterior a la recta (m).

El estudio de las distribuciones de la velocidad en rectas y en curvas ha confirmado la diferencia entre ellas, tanto en cuanto a la media como a la varianza. Por tanto, no sería adecuado caracterizar los diferenciales de velocidad en las transiciones recta-curva como la simple diferencia de los valores del perfil de velocidad de operación en la recta y en la curva. De hecho, como ya reflejaron en sus estudios Hirsh (1987) y McFadden y Elefteriadou (2000), aunque fueran iguales, el conductor asociado al percentil 85 en rectas no tendría por qué corresponderse con el conductor asociado al percentil 85 en curvas, por lo que carece de sentido evaluar la diferencia de velocidades entre ellos, así como el cálculo de las tasas de deceleración/aceleración a partir de ella.

Sin embargo, debido a su sencillez de cálculo, uno de los parámetros más utilizados en la evaluación de la consistencia es el decremento de velocidades de operación entre rectas y curvas (ΔV_{85}). Para una mayor aproximación al comportamiento de los conductores, la variable a utilizar debería ser $\Delta_{85}V$, definida como el percentil 85 de los decrementos de velocidad experimentados por los vehículos en las transiciones recta-curva. Según los resultados obtenidos de la presente investigación, se puede concluir que el percentil 85 de los decrementos de velocidad es un 20 % mayor que los correspondientes decrementos de la velocidad de operación, por lo que la utilización de estos subestima el decremento de velocidad experimentado por los conductores.

Con el fin de facilitar la estimación del estadístico $\Delta_{85}V$ para su inclusión en la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de carreteras, se ha calibrado un modelo que explica un 63.8 % de su variabilidad. Este modelo se define según la ecuación 107.

$$\Delta_{85}V = 9.051 + \frac{1527.328}{R} \quad (107)$$

donde:

R : radio de la curva circular (m).

El estudio de las distribuciones de velocidad en rectas y en curvas, también ha dado como resultado sendas combinaciones de modelos para su estimación (ver ecs. 94-97). Con estas ecuaciones se podría estimar la distribución de velocidades y, por

tanto, obtener el valor de la velocidad de operación como el percentil 85 de esta. Sin embargo, como se ha mostrado, el ajuste de estos modelos no es demasiado alto, por lo que la estimación del percentil 85 a partir de ellos presentaría un ajuste al real incluso menor.

Por ello, se han calibrado también una serie de modelos para la estimación de la velocidad de operación en curvas y en rectas. Asimismo, se han estudiado los fenómenos de la deceleración y la aceleración, calibrando sendos modelos para la estimación de sus tasas. Mediante la combinación de estos modelos, según una serie de reglas constructivas, es posible estimar el perfil continuo de velocidad de operación de un tramo de carretera convencional. Las ecuaciones de los modelos necesarios son:

- Curvas circulares. El modelo, calibrado a partir de una muestra de 108 curvas, explica un 72.14 % de la variabilidad de la velocidad de operación en curvas. Está definido por la ecuación 99.

$$V_{85} = 106.863 - 60.1185/e^{0.00422596 \cdot R} \quad (108)$$

donde:

R : radio de la curva circular (m).

- Rectas. El estudio de la velocidad en rectas ha dado como resultado una clasificación de las mismas en tres grupos:
 - Rectas con longitud mayor o igual a 700 metros. Su modelo, calibrado a partir de una muestra de 22 rectas, explica un 74.24 % de la variabilidad. Está definido por la ecuación 109.

$$V_{85} = \sqrt{-1464.72 + 351.288 \cdot \sqrt{L}} \quad (109)$$

donde:

L : longitud de la recta (m).

- Rectas con longitud inferior a 700 metros y radio de la curva anterior menor o igual a 600 metros. El modelo, calibrado a partir de una muestra de 42 rectas, explica un 45.48 % de la variabilidad. Se define según la combinación de ecuaciones 110.

$$V_{85} = 0.362739 \cdot V_{85C} + 59.6982/e^{-0.0000472302 \cdot GM}$$

$$V_{85C} = 106.863 - 60.1185/e^{0.00422596 \cdot R_1} \quad (110)$$

$$GM = \frac{L \cdot (R_1 \cdot R_2)^{0.5}}{100}$$

donde:

V_{85C} : velocidad de operación en la curva anterior (km/h).

GM : índice geométrico (m²).

L : longitud de la recta (m).

R_1 : radio de la curva anterior (m).

R_2 : radio de la curva posterior (m).

- o Rectas con longitud inferior a 700 metros y radio de la curva anterior mayor a 600 metros. En este caso, debido a la irregularidad de los datos de las 11 rectas de la muestra, se ha optado por el modelo ajustado para la totalidad de las rectas, que tiene un R^2 de 44.73 %. El modelo se define según la ecuación 111.

$$V_{85} = \sqrt{7399.27 + 3.03956 \cdot L} \quad (111)$$

donde:

L : longitud de la recta (m).

- Tasa de deceleración. El modelo calibrado, a partir de una muestra de 37 transiciones recta-curva, explica un 73.40 % de la variabilidad del percentil 85 de la tasa de deceleración de los conductores. Es importante destacar que no se ha optado por el análisis de la tasa de deceleración del perfil de velocidad correspondiente al percentil 85 por las consideraciones citadas anteriormente en este mismo apartado. Está definido por la ecuación 112.

$$d_{85} = \sqrt{-0.0652071 + 201.174/R} \quad (112)$$

donde:

R : radio de la curva (m).

- Tasa de aceleración. Al igual que en el caso de la deceleración, esta tasa no se corresponde con la tasa de aceleración del perfil de velocidad correspondiente al percentil 85, sino es que es el percentil 85 de las tasas de aceleración desarrolladas por los conductores. El modelo, calibrado a partir de una muestra de 27 transiciones curva-recta y definido por la ecuación 113, presenta un R^2 de 70.88 %.

$$a_{85} = 1 / -1.49325 + 0.548458 \cdot \ln(R) \quad (113)$$

donde:

R : radio de la curva (m).

Estos modelos, especialmente los referidos a la aceleración y deceleración, han sido calibrados gracias a los perfiles continuos de velocidad obtenidos empíricamente. Estos perfiles han permitido localizar los puntos inicial y final de la deceleración y la aceleración que se produce en cada perfil individual, así como también determinar la velocidad asociada.

Con todo ello, se han construido los perfiles continuos de velocidad estimada de los diez tramos de carretera convencional estudiados. Asimismo, se han construido los perfiles de velocidad correspondientes a la aplicación del modelo propuesto por el IHSDM. Al comparar ambos perfiles estimados con el perfil de velocidad de operación empírico correspondiente, se ha constatado que los resultados obtenidos para el modelo propuesto son, en general, mejores que los obtenidos para el modelo del IHSDM.

Durante este proceso de validación se observaron ciertas irregularidades en el perfil de velocidad estimado cuando en el estado de alineaciones aparece una curva con un ángulo de deflexión inferior a 5 gonios con, al menos, una recta adyacente de longitud inferior a 100 metros. Transformando este tipo de curvas en rectas y recalculando el perfil de velocidad estimado se constató una mejora sustancial en los resultados obtenidos. Por tanto, tras el proceso de validación se agregó una nueva regla de construcción del perfil.

Asimismo, durante este proceso, y también en 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 5 y el de rectas con longitud superior a 1100 metros a 7. Por tanto, este estudio debe completarse con una muestra mayor de geometrías de estas características.

Por otra parte, el análisis de los perfiles continuos de velocidad, tanto individuales como de operación, ha permitido comprobar o refutar algunas de las hipótesis o conclusiones de investigaciones anteriores:

- La distribución de la velocidad en curvas y en rectas es diferente. Por tanto, no puede considerarse en el análisis de consistencia la simple diferencia entre la velocidad de operación en rectas y en curvas, como ya se ha comentado en este mismo apartado.
- En estudios anteriores, la caracterización de la velocidad de operación 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 los parámetros V85MIN (velocidad de operación mínima en una curva), VMIN85 (percentil 85 de las velocidades mínimas en una curva) y V85CTRO (velocidad de operación en el punto medio de una curva), pueden considerarse estadísticamente iguales.
- Estas limitaciones en la toma de datos obligaban a los investigadores a suponer velocidad constante en la curva e igual a la velocidad registrada en el punto medio de la misma. En el presente trabajo de investigación se ha comprobado, a partir del análisis del desarrollo de la deceleración y la aceleración y de la velocidad en la curva circular, que la velocidad de operación puede considerarse constante en la curva circular pero no en las curvas de transición.
- Del análisis en profundidad de los fenómenos de deceleración y aceleración, se concluye que ambas se extienden tanto en la recta como en

la curva de transición. Por tanto, la hipótesis de que las transiciones de velocidad se producen únicamente en el tramo recto adyacente a la curva no es cierta.

- Las características de las curvas de transición presentan una influencia considerable tanto en la velocidad de operación desarrollada en las curvas circulares, como en los percentiles 85 de las tasas de aceleración y deceleración. De hecho, en el análisis realizado se ha observado claramente como al aumentar el parámetro de la clotoide, y por tanto suavizar la transición recta-curva-recta, la velocidad de operación en curva aumenta y los percentiles de las tasas de deceleración y aceleración disminuyen. Podría entenderse que esta influencia se debe a que el parámetro de la clotoide es función del radio de la curva y que es esta variable la que presenta la citada correlación. Sin embargo, tendencias similares, aunque menos significativas, se han observado en el estudio de la longitud de la curva de transición.
- Algunas investigaciones han establecido una serie de criterios para la ubicación de los dispositivos de toma de datos puntual de velocidad para el estudio de la deceleración y la aceleración. En el presente estudio se ha comprobado que estos criterios dan resultados que no se corresponden con la realidad, subestimando en general los valores de ambos fenómenos.
- Teniendo en cuenta que en muchas ocasiones no es factible la toma de datos continuos de velocidad, se han propuesto ciertos criterios para la localización de los dispositivos de toma de datos puntual, con el fin de obtener una mayor aproximación a los fenómenos reales. Estos criterios consisten básicamente en:
 - Estudio de la velocidad de operación en curvas: ubicación del dispositivo en el punto medio de la misma.
 - Estudio de la velocidad de operación en rectas: ubicación del dispositivo en el punto medio de su desarrollo.
 - Estudio del fenómeno de la deceleración: ubicación de los dispositivos 70 metros antes del inicio de la clotoide y en la segunda mitad de esta.
 - Estudio del fenómeno de la aceleración: ubicación de los dispositivos en la primera mitad de la clotoide posterior a la curva circular y 100 metros dentro de la recta.

Aún ubicando los dispositivos de esta manera, los datos nunca serán comparables con los obtenidos a partir de perfiles continuos de velocidad. De todas formas, se recomienda identificar las velocidades de los conductores individuales en los sucesivos puntos, con el fin de no restringir el estudio únicamente a datos agregados de velocidad.

- Diferentes investigaciones han incluido en el estudio de la velocidad de operación en recta y en curva y de la tasa de deceleración y aceleración la pendiente longitudinal. Los resultados obtenidos han sido dispares y, en general, poco significativos. Por ello, en el presente trabajo de investigación se ha estudiado la influencia de la pendiente en cada uno de los parámetros analizados:

- Velocidad de operación en curva: la velocidad tiende a disminuir al aumentar la pendiente, sin embargo esta relación no es estadísticamente significativa.
- Velocidad de operación en recta: la influencia de la pendiente es similar a la descrita para la velocidad de operación en curva.
- ΔV_{85} y $\Delta_{85}V$: el estudio de correlación realizado muestra, para ambos parámetros, una relación estadísticamente significativa y positiva tanto con la pendiente de la recta anterior como con la pendiente de la curva.
- Tasa de deceleración: la pendiente longitudinal presenta una relación positiva con esta variable, pero no estadísticamente significativa.
- Tasa de aceleración: el análisis de correlación ha mostrado una relación negativa, tanto con la pendiente de curva como con la pendiente de la recta. No obstante, únicamente la relación con la pendiente de la curva es estadísticamente significativa.

Todos estos resultados se han obtenido y pueden obtenerse gracias a los perfiles continuos de velocidad resultado de la aplicación de la nueva metodología de toma de datos basada en dispositivos rastreadores GPS, que se ha presentado en este trabajo de investigación.

Todo ello puede convertirse en una herramienta eficaz para estudiar la seguridad vial en nuevos trazados, antes de adoptar las soluciones definitivas durante las fases de planeamiento y proyecto, evaluando así la consistencia del diseño geométrico.

Además de los datos procedentes de los GPS, durante las jornadas de toma de datos, se han registrado las características de los conductores, del viaje que realizan y del vehículo que conducen. Estas características se han relacionado con la velocidad desarrollada en rectas y en curvas, disponible en su perfil de velocidad individual. Asimismo, estas características también se han relacionado con las tasas de aceleración y deceleración individuales.

Para este análisis, en lugar de realizar un estudio individual de cada una de las variables, se ha optado por realizar un análisis multivariable, con el fin de no confundir los efectos producidos con cada una de las variables, por la posible relación existente entre ellas.

Los resultados del estudio han mostrado una baja influencia de estas variables en las tasas de aceleración y deceleración desarrolladas. Sin embargo, la influencia en la velocidad es considerable. Tanto en el caso de la velocidad desarrollada en rectas como en curvas, se distinguen claramente distintos grupos de población con estilos de conducción diferentes. Así, las conclusiones más importantes son:

- Los hombres tienden a conducir a una velocidad mayor que las mujeres.
- Los conductores jóvenes asumen un riesgo mayor, asociado a una velocidad mayor. Con el aumento de la edad la velocidad disminuye.
- Las personas con menos experiencia en la conducción tienden a circular a una velocidad menor que el resto.

- La longitud del viaje no influye en la velocidad desarrollada, así como el motivo del mismo.
- Los conductores que conocen la carretera conducen a una velocidad mayor que los que no son habituales.
- La presencia de pasajeros, especialmente ancianos, produce una disminución en la velocidad desarrollada.

En general, la diferencia entre estos comportamientos es más acusada cuando la variable considerada es la velocidad desarrollada en rectas. Por tanto, se recomienda su utilización para la caracterización de los diferentes estilos de conducción.

El hecho de tener en cuenta estas conclusiones en programas de educación vial y en campañas de concienciación puede aumentar considerablemente su eficacia.

Así, este trabajo de investigación no sólo ha desarrollado herramientas a emplear en el diseño y en la mejora de tramos de carretera convencional, sino que ha presentado también avances en la metodología de toma de datos y en el tratamiento de los mismos y ha suministrado información esencial para la comprensión del comportamiento de los conductores.

El presente trabajo de tesis también ha contribuido al estado del arte a nivel nacional e internacional, a partir de una serie de publicaciones, cuyo compendio se recoge en el último apartado de referencias. En él pueden encontrarse tanto publicaciones directamente relacionadas con las metodologías y resultados presentados en este documento, como relacionadas con otras investigaciones que se han llevado a cabo gracias a los resultados obtenidos de esta. Este hecho supone un buen indicador de que esta investigación no está cerrada, sino que está sirviendo de base para siguientes investigaciones.

13. APORTACIONES

A continuación, se detallan las contribuciones principales que se derivan del presente trabajo de investigación. Estas aportaciones se refieren no sólo a los resultados propios de la tesis, sino también a las aportaciones metodológicas que suponen distintos procedimientos que se han desarrollado a lo largo de la misma.

13.1. RESULTADOS DE LA TESIS

El principal objetivo que ha motivado la realización de la presente tesis ha sido la caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales, especialmente desde el punto de vista de la influencia de la geometría de su trazado. Por ello, el principal resultado obtenido son los modelos calibrados para la estimación de la velocidad de operación en recta y en curva y de las tasas de deceleración y aceleración, así como el estudio de la distribución de la velocidad que ello conlleva. Las principales aportaciones de este estudio son las siguientes:

- Puede considerarse válido asumir que la distribución de la velocidad desarrollada en rectas y en curvas se comporta según una distribución normal.
- La distribución de la velocidad en rectas y en curvas es distinta, siendo la desviación típica en rectas mucho mayor que en curvas.
- La media y la desviación típica de la distribución de la velocidad en curvas pueden estimarse según las ecuaciones 114 y 115, que explican un 53.87 % y un 35.14 % de la variabilidad de la media y de la desviación, respectivamente.

$$V_{M_C} = \sqrt{-7619.89 + 2420.63 \cdot \ln(R)} \quad (114)$$

$$\sigma_{V_C} = \sqrt{14.8194 + 5.38444 \cdot \sqrt{R}} \quad (115)$$

donde:

V_{M_C} : media de la distribución de la velocidad en curvas (km/h).

σ_{V_C} : desviación típica de la distribución de la velocidad en curvas (km/h).

R : radio de la curva circular (m).

- La media y la desviación típica de la distribución de la velocidad en rectas pueden estimarse según las ecuaciones 116 y 117, que explican un 37.11 % y un 63.40 % de la variabilidad de la media y de la desviación, respectivamente.

$$V_{M_R} = \sqrt{5726.48 + 1.79155 \cdot (L + L_{CL1_2} + L_{CL2_1})} \quad (116)$$

$$\sigma_{V_R} = \sqrt{124.982 + 0.000046576 \cdot L^2} \quad (117)$$

donde:

V_{M_R} : media de la distribución de la velocidad en rectas (km/h).

σ_{V_R} : desviación típica de la distribución de la velocidad en rectas (km/h).

L : longitud de la recta (m).

L_{CL1_2} : longitud de la clotoide anterior a la recta (m).

L_{CL2_1} : longitud de la clotoide posterior a la recta (m).

- El percentil 85 de los decrementos de velocidad experimentados por los vehículos en las transiciones recta-curva ($\Delta_{85}V$) es un 20 % mayor que los correspondientes decrementos de la velocidad de operación (ΔV_{85}).
- El estadístico $\Delta_{85}V$ puede estimarse a partir del modelo definido según la ecuación 118, que explica un 63.8 % de su variabilidad.

$$\Delta_{85}V = 9.051 + \frac{1527.328}{R} \quad (118)$$

donde:

R : radio de la curva circular (m).

- Los parámetros V85MIN (velocidad de operación mínima en una curva), VMIN85 (percentil 85 de las velocidades mínimas en una curva) y V85CTRO (velocidad de operación en el punto medio de una curva), pueden considerarse estadísticamente iguales.
- La velocidad de operación puede considerarse constante en la curva circular pero no en las curvas de transición.
- Tanto la deceleración como la aceleración se extienden tanto en la recta como en la curva de transición correspondientes.
- Las características de las curvas de transición presentan una influencia considerable tanto en la velocidad de operación desarrollada en las curvas circulares, como en los percentiles 85 de las tasas de deceleración y aceleración.
- Del estudio de la influencia de la pendiente longitudinal en cada uno de los parámetros analizados se han obtenido los siguientes resultados:
 - Velocidad de operación en curva: la velocidad tiende a disminuir al aumentar la pendiente, sin embargo esta relación no es estadísticamente significativa.
 - Velocidad de operación en recta: la influencia de la pendiente es similar a la descrita para la velocidad de operación en curva.
 - ΔV_{85} y $\Delta_{85}V$: el estudio de correlación realizado muestra, para ambos parámetros, una relación estadísticamente significativa y positiva tanto con la pendiente de la recta anterior como con la pendiente de la curva.

- Tasa de deceleración: la pendiente longitudinal presenta una relación positiva con esta variable, pero no estadísticamente significativa.
- Tasa de aceleración: el análisis de correlación ha mostrado una relación negativa, tanto con la pendiente de la curva como con la pendiente de la recta. No obstante, únicamente la relación con la pendiente de la curva es estadísticamente significativa.
- El perfil continuo de velocidad de operación de un tramo de carretera convencional puede estimarse a partir de la combinación, mediante una serie de reglas constructivas, de los siguientes modelos:
 - Curvas circulares. El modelo, definido en la ecuación 119, explica un 72.14 % de la variabilidad de la velocidad de operación en curvas.

$$V_{85} = 106.863 - 60.1185/e^{0.00422596 \cdot R} \quad (119)$$

donde:

R : radio de la curva circular (m).

- Rectas. El estudio de la velocidad de operación en rectas ha dado como resultado una clasificación de las mismas en tres grupos:

Rectas con longitud mayor o igual a 700 metros. Su modelo explica un 74.24 % de la variabilidad. Está definido por la ecuación 120.

$$V_{85} = \sqrt{-1464.72 + 351.288 \cdot \sqrt{L}} \quad (120)$$

donde:

L : longitud de la recta (m).

Rectas con longitud inferior a 700 metros y radio de la curva anterior menor o igual a 600 metros. El modelo explica un 45.48 % de la variabilidad. Se define según la combinación de ecuaciones 121.

$$V_{85} = 0.362739 \cdot V_{85C} + 59.6982/e^{-0.0000472302 \cdot GM}$$

$$V_{85C} = 106.863 - 60.1185/e^{0.00422596 \cdot R_1} \quad (121)$$

$$GM = \frac{L \cdot (R_1 \cdot R_2)^{0.5}}{100}$$

donde:

V_{85C} : velocidad de operación en la curva anterior (km/h).

GM : índice geométrico (m²).

L : longitud de la recta (m).

R_1 : radio de la curva anterior (m).

R_2 : radio de la curva posterior (m).

Rectas con longitud inferior a 700 metros y radio de la curva anterior mayor a 600 metros. El modelo, que tiene un R^2 de 44.73 %, se define según la ecuación 122.

$$V_{85} = \sqrt{7399.27 + 3.03956 \cdot L} \quad (122)$$

donde:

L : longitud de la recta (m).

- Tasa de deceleración. El modelo calibrado explica un 73.40 % de la variabilidad del percentil 85 de la tasa de deceleración de los conductores. Está definido por la ecuación 123.

$$d_{85} = \sqrt{-0.0652071 + 201.174/R} \quad (123)$$

donde:

R : radio de la curva (m).

- Tasa de aceleración. El modelo para la estimación del percentil 85 de la tasa de aceleración de los conductores viene definido por la ecuación 124, presentando un R^2 de 70.88 %.

$$a_{85} = 1/_{-1.49325 + 0.548458 \cdot \ln(R)} \quad (124)$$

donde:

R : radio de la curva (m).

Además de la caracterización y modelización de la velocidad desde el punto de vista de la influencia de la geometría de la carretera, el objetivo del presente trabajo de investigación incluye también la caracterización de la velocidad considerando las características de los conductores, del viaje que realizan y del vehículo que conducen. Para su consecución se han relacionado estas características con la velocidad desarrollada en rectas y en curvas, y con las tasas de aceleración y deceleración individuales. Las principales conclusiones del análisis multivariante realizado son:

- Los hombres tienden a conducir a una velocidad mayor que las mujeres.
- Los conductores jóvenes asumen un riesgo mayor, asociado a una velocidad mayor. Con el aumento de la edad la velocidad disminuye.
- Las personas con menos experiencia en la conducción tienden a circular a una velocidad menor que el resto.
- La longitud del viaje no influye en la velocidad desarrollada, así como el motivo del mismo.

- Los conductores que conocen la carretera conducen a una velocidad mayor que los que no son habituales.
- La presencia de pasajeros, especialmente ancianos, produce una disminución en la velocidad desarrollada.

13.2. APORTACIONES METODOLÓGICAS

Los resultados mencionados en el apartado anterior se han obtenido y pueden obtenerse gracias a los perfiles continuos de velocidad, resultado de la toma de datos realizada. La metodología aplicada en ella es la principal aportación metodológica de este trabajo de investigación.

El procedimiento desarrollado se basa en la colocación de dispositivos rastreadores GPS sobre una muestra de vehículos de conductores que se encuentran circulando por el tramo de carretera a estudiar. De esta forma, es posible obtener las trayectorias descritas, los perfiles continuos de velocidad y las características de los propios conductores de un tramo de carretera y no de voluntarios previamente seleccionados.

Otra notable aportación metodológica es el proceso de restitución de la geometría del trazado de un tramo de carretera a partir de las trayectorias descritas por una muestra de vehículos, equipados con los dispositivos mencionados, realizando el mismo recorrido en ambos sentidos de circulación. El procedimiento se basa en la obtención de la trayectoria media y de los diagramas de curvaturas y azimut asociados a la misma. A partir de estos diagramas se obtiene el correspondiente estado de alineaciones, obteniendo mejores resultados con la metodología basada en el diagrama de azimut.

Esta metodología para la estimación de la geometría de un tramo de carretera, no sólo puede aplicarse a datos procedentes de una toma de datos similar a la desarrollada en la presente investigación, sino que puede aplicarse a cualquier conjunto de datos de geometría que se presenten en función de la longitud y latitud de los puntos que forman el trazado o de sus coordenadas. Este es el caso de los datos procedentes de un inventario de carreteras o, incluso, de los datos obtenidos tras el clicado de sucesivos puntos sobre el eje de la carretera a estudiar en la aplicación Google Earth, o en otras imágenes aéreas o de satélite.

Por otra parte, a partir del estudio de los perfiles continuos de velocidad obtenidos, se establecen una serie de criterios para la ubicación de los dispositivos de medición de velocidad, en el caso de realizar únicamente un estudio puntual de la misma. Estos criterios son:

- Estudio de la velocidad de operación en curvas: ubicación del dispositivo en el punto medio de la misma.
- Estudio de la velocidad de operación en rectas: ubicación del dispositivo en el punto medio de su desarrollo.
- Estudio del fenómeno de la deceleración: ubicación de los dispositivos 70 metros antes del inicio de la clotoide y en la segunda mitad de esta.

- Estudio del fenómeno de la aceleración: ubicación de los dispositivos en la primera mitad de la clotoide posterior a la curva circular y 100 metros dentro de la recta.

En cualquier caso se recomienda identificar las velocidades de los conductores individuales en los sucesivos puntos, con el fin de no restringir el estudio únicamente a datos agregados de velocidad.

Valencia, 1 de junio de 2012

Ana María Pérez Zuriaga

REFERENCIAS

- Aarts, L. y Van Schagen, I. (2006). *Driving speed and the risk of road crashes: a review*. Accident Analysis and Prevention, vol. 38, pp. 215-224.
- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (2004). *A policy on geometric design of highway and streets*. AASHTO, Washington, D.C.
- Bella, F. (2008). Assumptions of operating speed-profile models on deceleration and acceleration rates: verification in the driving simulator. 87th Annual Meeting Transportation Research Board, Washington D.C.
- Ben-Arieh, D., Chang, S., Rys, M. Y Zhang, G. (2004). Geometric Modeling of Highways Using Global Positioning System Data and B-Spline Approximation. Journal of Transportation Engineering, pp. 632-636.
- Bonneson, J.A y Pratt, M.P. (2009). A model for predicting speed along horizontal curves on two-lane highways. 88th Annual Meeting Transport Research Board, Washington, D.C.
- Castro, M., Iglesias, L., Rodríguez Solano, R. y Sánchez, J.A. (2006). *Geometric Modelling of Highways Using Global Positioning System (GPS) Data and Spline Approximation*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 14(4), pp. 233-243.
- Castro, M., Iglesias, L., Rodríguez-Solano, R., and Sánchez, J. A. (2008). *Highway safety analysis using geographic information systems*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 161(2), 91–97.
- Castro, M., Sánchez, J.A., Vaquero, C.M., Iglesias, L. y Rodriguez-Solano, R. (2008). *Automated GIS-based system for speed estimation and highway safety evaluation*. Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 22, Nº 5, pp. 325-331.
- Castro, M., Sánchez, J.F., Ardila, N. y Melo, J. (2010). *Speed models for highway consistency analysis. A Colombian case study*. 4th International Symposium on Highway Geometric Design. Valencia, España.
- Castro, M., Sánchez, J.F., Sánchez, J.A. y Iglesias, L. (2011). *Operating speed and speed differential for highway design consistency*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 137, No 11, pp. 837-840.
- Castro, M., Sánchez, J.F. y Sánchez, J.A. (2012). *Operating speed models for two-lane rural highways*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 165, No TR2, pp. 107-118.
- Choueiri, E.M y Lamm, R. (1987). Recommendation for evaluating horizontal design consistency based on investigations in the state of New York. Transportation Research Record, pp. 68-78.
- Cielecki, A. y Wieckowski, M. (1993). *Highways*. Proc., Seminar B, PTRC European Transport, Highways and Planning 21st Summer Annual Meeting, Vol. P364, 1993, pp. 217–232.

- Dell'Acqua, G. y Russo, F. (2010). *Speed Factors on Low-Volume Roads for Horizontal Curves and Tangents*. Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, Vol. 5, pp. 89-97.
- Dominguez-Lira, C.A., Castro, M., Pardillo-Mora, J.M. y Gascón-Varón, C. (2010). *Adaptation and calibration of IHSDM for highway projects safety evaluation in Spain*. 4th International Symposium on Highway Geometric Design. Valencia, España.
- Collins, J., Fitzpatrick, K., Bauer, K.M. y Harwood, D.W. (1999). *Speed variability on rural two-lane highways*. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol. 1658, pp. 60-69.
- Collins, K.M. y Krammes, R.A. (1996). *Preliminary validation of a speed-profile model for design consistency evaluation*. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol. 1523, pp. 11-21.
- Crisman, B., Marchionna, A., Perco, P., y Roberti, R. (2005). *Operating speed prediction model for two-lane rural roads*. Departamento de Ingeniería Civil - Universidad de Trieste.
- Dong, H., Easa, S.M. y Li, J. (2007). *Approximate Extraction of Spiralled Horizontal Curves from Satellite Imagery*. Journal of Surveying Engineering.
- Easa, S. M. (2003). *Improved speed-profile model for two-lane rural highways*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 30(6), pp. 1055-1065.
- Easa, S.M., Dong, H. y Li, J. (2007). *Use of Satellite Imagery for Establish Road Horizontal Alignments*. Journal of Surveying Engineering.
- Elvik, R., Christensen, P. y Amundsen, A. (2004). *Speed and road accidents. An evaluation of the power model*. TOI Report 740/2004. Oslo: Institute of Transport Economics.
- Figuroa Medina, A. M., y Tarko, A. P. (2007). *Speed changes in the vicinity of horizontal curves on two-lane rural roads*. Journal of Transportation Engineering - ASCE, pp. 217-222.
- Fildes, B.N., Rumbold, G. y Leening, A. (1991). *Speed behavior and drivers' attitude to speeding*. General Report No. 16. VIC Roads, Hawthorn, Vic.
- Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B., y otros. (2000). *Speed prediction for two-lane rural highways*. FHWA.
- Fitzpatrick, K., y Collins, J. M. (2000). *Speed-profile model for two-lane rural highways*. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol. 1737, pp. 42-49.
- Gavany, S.G., Plummer, P. y Grigg, P. (1997). *Why drivers speed: the speeding perception inventory*. Journal of Safety Research.
- Gibreel, G. M., Easa, S.M., Hassan, Y. y El-Dimeery, I.A. (1999). *State of the art of highway geometric design consistency*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 125, pp. 305-313.

- Gibreel, G. M., Easa, S. M., y El-Dimeery, I. A. (2001). *Prediction of operating speed on three-dimensional highway alignments*. Journal of Transportation Engineering - ASCE , pp. 21-30.
- Hassan, Y., Sarham, M., Dimaiuta, M., Donnell, E., Himes, S., Porter, R., Psarianos, B., García, A., Perco, P. y Taylor, M.(2011). *Modeling operating speed: synthesis report*. Transportation Research Circular number E-C151. Transportation Research Board.
- Hansen, G., Garrick, N. W., Ivan, J. N., y Jonsson, T. (2007). *Variation in Free Flow Speed due to Roadway Type and Roadway Environment*. Transportation Research Board, 86th Annual Meeting.
- Hirsh, M. (1987). *Probabilistic approach to consistency in geometric design*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 113 (3), pp. 268–276.
- Horswill, M.S. y Coster, M.E. (2010). The effect of vehicle characteristics on drivers' risk-taking behavior. *Ergonomics*, Vol. 45, No. 2, pp. 85-104.
- Hu, W. y Donnel, E.T. (2008). *Models of Acceleration and Deceleration Rates on a Complex Two-Lane Rural Highway: Results from a Nighttime Driving Experiment*. 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Highway Safety Manual (2010). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC.
- Ibrahim, A.T. y Hall, F.L. (1994). *Effect of adverse weather conditions on speed-flow-occupancy relationships*. Transportation Research Record, Vol. 1457, pp. 184-191.
- Imran, M., Hassan, Y. y Patterson, D. (2006). *GPS-GIS-Based Procedure for Tracking Vehicle Path on Horizontal Alignments*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 21, pp. 383-394.
- Islam, M. N., y Seneviratne, P. N. (1994). *Evaluation of design consistency of two-lane highways*. ITE J., Vol. 64 (2), pp. 28–31.
- Institute of Transportation Engineers (1993). *Speed Zone Guidelines: A Proposed Recommended Practice*. Washington, DC.
- Jessen, D. R., Schurr, K. S., McCoy, P. T., Pesti, G., y Huff, R. R. (2001). *Operating speed prediction on crest vertical curves of rural two-lane highways in nebraska*. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol. 1751, pp. 67-75.
- Jiang, Y. y Li, S. (2002). *Measuring and Analyzing Vehicle Position and Speed Data at Work Zones Using Global Positioning System*. Institute of Transportation Engineers. ITE Journal.
- Jorgensen, F. y Polak, J. (1993). *The effect of personal characteristics on drivers' speed selection. An economic approach*. Journal of Transport Economics and Policy, pp. 237-252.
- Kockelke W. y Steinbrecher J. (1987). *Driving behavior investigations with respect to traffic safety in the area of community entrances*. Report of the Research Project

8363 of the German Federal Research Institute (Bundesanstalt für Strassenwesen Bereich Unfallforschung - BASt), n°153, Bergisch Gladbach, Germany.

Lajunen, T., Karola, J. y Summala, H. (1997). *Speed and acceleration as measures of driving style in young male drivers*. Perceptual and Motor Skills, Vol. 85, pp. 3-16.

Lamm, R., Choueiri E. M., y Hayward J. C. (1988). *Tangent as an independent design element*. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol. 1195, pp. 123–131.

Lan, C.J. y Menendez, M. (2003) *Truck Speed Profile Models for Critical Length of Grade*. ASCE. Journal of Transportation Engineering, 129(4): 408-419.

Lipar, P., Lakner, M., Maher, T. y Zura, M. (2011). *Estimation of road centerline curvature from raw GPS data*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, N° 6, Vol. 3, pp. 163-168.

McFadden, J., y Elefteriadou, L. (1997). *Formulation and validation of operating speed-based models using bootstrapping*. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol. 1579, pp. 97–103.

McFadden J. y Elefteriadou L. (2000). *Evaluating horizontal alignment design consistency of two-lane rural highway: development of new procedure*. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol. 1737.

Ministerio de Fomento (1999). *Instrucción de Carreteras. Norma 3.1-IC Trazado*.

Ministerio de Fomento (1999). *Norma 8.1-IC Señalización vertical*.

Misaghi, P. (2003). *Modelling operating speed and speed differential for design consistency evaluation*. M.Sc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada.

Misaghi, P. y Hassan, Y. (2005). *Modeling operating speed and speed differential on two-lane rural roads*. Journal of Transportation Engineering / ASCE, pp. 408-417.

Montoro González, L., Roca Ruíz, J. y Lucas-Alba, A. (2010). *Creencias de los conductores españoles sobre la velocidad*. Psicothema, Vol. 22, n° 4, pp. 858-864

Nehate, G., y Rys, M. (2006). *3D Calculation of Stopping-Sight Distance from GPS Data*. Journal of Transportation Engineering.

Nie, B., y Hassan, Y. (2007). *Modeling driver speed behavior on horizontal curves of different road classifications*. 86th Annual Meeting Transportation Research Board.

Ottesen, J. L., y Krammes, R. A. (2000). *Speed-profile model for a design-consistency evaluation procedure in the United States*. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol. 1701, pp. 76-85.

Park, P.Y, Miranda-Moreno, L.F, y Saccomanno, F.F. (2010). *Estimation of speed differentials on rural highways using multilevel models*. 85th Annual Meeting Transportation Research Board.

- Passetti, K., y Fambro, D. B. (1999). *Comparison of passenger car speeds at curves with spiral transitions and circular curves*. 78th Annual Meeting Transportation Research Board.
- Perco, P., y Robba, A. (2006). *Evaluation of the deceleration rate for the operating speed-profile model*.
- Polus, A., Fitzpatrick, K., y Fambro, D. B. (2000). *Predicting operating speeds on tangent sections of two-lane rural highways*. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol. 1737, pp. 50-57.
- Polus, A. y Mattar-Habib, C. (2004). *New consistency model for rural highways and its relationship to safety*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 130, No. 3, p. 286-293.
- Polus, A., Pollatschek, M. y Mattar-Habib, C. (2005). *An enhanced integrated design-consistency model for both level and mountainous highways and its relationship to safety*. Road and Transportation Research, Vol. 14, No. 4, pp. 13-26.
- Rocci, S. (1993). *Libro blanco sobre velocidad, visibilidad y adelantamientos*.
- Rocci, S. (1993). *La velocidad: ¿Hacia un enfoque realista?* Revista RUTAS, Vol. 39, pp. 15-26.
- Rocci, S. y García, A. (2006). *Propuesta para la reordenación de los límites de velocidad*. Revista RUTAS, Vol. 113, pp. 13-18.
- Rocci, S. (2010). *La velocidad, base del trazado (1ª parte)*. Revista RUTAS, Vol. 141, pp. 29-38.
- Rocci, S. (2011). *La velocidad, base del trazado (2ª parte)*. Revista RUTAS, Vol. 142, pp. 8-15.
- Schurr, K.S., McCoy, P.T., Pesti, G. y Huff, R. (2002). *Relationship of design, operating, and posted speeds on horizontal curves of rural two-lane highways in Nebraska*. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol. 1796, pp. 60-71.
- Schwebel, D.C., Ball, K.K., Severson, J., Barton, B.K., Rizzo, M. y Viamonte, S.M. (2007). *Individual difference factors in risky driving among older adults*. Journal of Safety Research, Vol. 38, pp. 501-509.
- Stradling, S.G. (2007). *Car driver speed choice in Scotland*. Ergonomics.
- Tarko, A.P. y Figueroa Medina, A.M. (2006). *Implications of risk perception under the assumption of driver rational behavior*. TRB Annual Meeting.
- Treat, J.R., Tumbas, N.S., McDonald, S.T., Shinar, D., Hume, R.D., Mayer, R.E., Stansifer, R.L. y Castellan, N.J. (1979). *Tri-level study of the causes of traffic accidents: Final report – Executive summary*. Bloomington. Institute for Research in Public Safety. [REPORT No. DOT-HS-034-3-535-79-TAC(S)].
- Wahlberg, A.E. (2006). *Speed choice versus acceleration behavior as traffic accident predictor*. Journal of Safety Research, Vol. 37, pp. 43-51.

Wang, J. et al. (2006). *Operating Speed Model for Low Speed Urban Tangent Streets Based on In-Vehicle GPS Data*. 85th TRB Annual Meeting CD-ROM.

Wasielowski, P. (1984). *Speed as a measure of driver risk: observed speeds versus driver and vehicle characteristics*. *Accidents Analysis and Prevention*, Vol. 16, Nº. 2, pp. 89-103.

Williams, A.F., Kyrychenko, S.Y y Retting, R.A. (2006). *Characteristics of speeders*. *Journal of Safety Research*, Vol. 37, pp. 227-232

Yang, L. y Hassan, Y. (2008). *Driver Speed and Acceleration Behavior on Canadian Roads*. 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

Ye, Q., Tarko, A. P., & Sinha, K. C. (2001). *A Free-Flow Speed Model for Indiana Arterial Roads*. Transportation Research Board, 80th Annual Meeting, 16.

PUBLICACIONES DE LA TESIS

A continuación, se detallan las diferentes publicaciones que se han llevado a cabo como resultado de la presente tesis doctoral. Entre ellas, se distingue entre aquellas que están directamente relacionadas con el trabajo de investigación, en las que se describen metodologías o resultados descritos en la tesis, y aquellas que, a pesar de no tener como objetivo la presentación de resultados conseguidos durante el desarrollo de la tesis, se basan en ellos. En este último caso se engloban publicaciones relacionadas con la consistencia del diseño geométrico, para las que se han estimado los perfiles de velocidad de operación necesarios mediante los modelos y reglas de construcción descritos en este trabajo de investigación.

Las publicaciones completas se adjuntan en el anexo XVI.

PUBLICACIONES DIRECTAMENTE RELACIONADAS

Revistas

Pérez Zuriaga, A.M., García García, A., Camacho Torregrosa, F.J. y D'Attoma, P. (2010). *Modeling operating speed and deceleration on two-lane rural roads with global positioning system data*. *Transportation Research Record*, vol. 2171, pag. 11-20.

Referenciada por:

Lipar, P., Lakner, M., Maher, T. y Žura, M. (2011). *Estimation of road centerline curvature from raw GPS data*. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 6(3), pp. 163-168.

Moreno, A.T., García, A. y Romero, M. A. (2011). *Speed table evaluation and speed modeling for low-volume crosstown roads*. *Transportation Research Record*, vol. 2203, pag. 85-93.

Belz, N.P. y Aultman-Hall, L. (2011). *Analyzing the effect of driver age on operating speed and acceleration noise*. Transportation Research Record, vol. 2265, pag. 184-191.

Congresos nacionales

Pérez Zuriaga, A.M., García, A. y Camacho Torregrosa, F.J. (2012). *Análisis de los factores que condicionan la velocidad elegida por los conductores en rectas de carreteras convencionales*. X congreso de Ingeniería del Transporte. Granada, España.

Pérez Zuriaga, A.M., García García, A. y Camacho Torregrosa, F.J. (2010). *Estudio de la transición recta-curva a partir de perfiles continuos de velocidad empíricos*. IX Congreso de Ingeniería del Transporte. Madrid, España.

Pérez Zuriaga, A.M., García García, A., Romero Rojas, M. y Camacho Torregrosa, F.J. (2008). *Aplicación de rastreadores GPS para la restitución de la geometría de la vía*. VIII Congreso de Ingeniería del Transporte. A Coruña, España.

Pérez Zuriaga, A.M., García García, A., Romero Rojas, M. y Camacho Torregrosa, F.J. (2007). *Utilización de equipos GPS de seguimiento pasivo en la obtención de la geometría de la vía y en la evaluación de la seguridad vial*. VII Congreso Español sobre Sistemas Inteligentes de Transporte. Valencia, España.

Congresos internacionales

Pérez Zuriaga, A.M., García García, A. y Camacho Torregrosa, F.J. (2011). *Study of tangent-to-curve transition on two-lane rural roads with continuous speed profiles*. 90th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, D.C., EEUU.

Pérez Zuriaga, A.M., García García, A., Camacho Torregrosa, F.J. y D'Attoma, P. (2010). *Use of GPS data to model operating speed and deceleration on two-lane rural roads*. 89th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, D.C., EEUU.

Libros

Pérez Zuriaga, A.M., García García, A. y Camacho Torregrosa, F.J. (2011). *La velocidad de operación y su aplicación en el análisis de la consistencia de carreteras para la mejora de la seguridad vial*. Cuaderno Tecnológico de la PTC. ISBN: 978-84-615-3971-0. Plataforma Tecnológica de la Carretera.

OTRAS PUBLICACIONES RELACIONADAS

Congresos nacionales

Camacho Torregrosa, F.J., García, A. y Pérez Zuriaga, A.M (2012). *Modelo global de consistencia del diseño geométrico de carreteras convencionales*. X congreso de Ingeniería del Transporte. Granada, España.

Congresos internacionales

García, A., Llopis Castelló, D., Pérez Zuriaga, A.M. y Camacho Torregrosa, F.J. (2012). *Un nuevo indicador de la consistencia del diseño geométrico de carreteras*. III Congreso Iberoamericano de Seguridad Vial. Bogotá, Colombia.

Camacho Torregrosa, F.J., Pérez Zuriaga, A.M y García, A. (2011). *New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation*. Proceedings of the 3rd Road Safety and Simulation Conference. Indianapolis, USA

Camacho Torregrosa, F.J., Pérez Zuriaga, A.M. y García García, A. (2010). *Mathematical model to determine road geometric consistency in order to reduce road crashes*. Mathematical models of addictive behavior, medicine & engineering. Valencia, España.