UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

POLITÉCNICA

**INVENTARIOS DE CARRETERAS Y
RECONSTRUCCIÓN DEL TRAZADO
MEDIANTE VÍDEO, RECEPTORES GNSS Y
OTRAS HERRAMIENTAS DE BAJO COSTE**

TESIS DOCTORAL

SANTIAGO HIGUERA DE FRUTOS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

2017

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL:
TRANSPORTE Y TERRITORIO**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

**INVENTARIOS DE CARRETERAS Y
RECONSTRUCCIÓN DEL TRAZADO
MEDIANTE VÍDEO, RECEPTORES GNSS Y
OTRAS HERRAMIENTAS DE BAJO COSTE**

Autor:

SANTIAGO HIGUERA DE FRUTOS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Directora de la tesis:

MARÍA CASTRO MALPICA

Dr. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

2017

Tribunal nombrado por el Magnífico y Excelentísimo Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día _____ de _____ de 2017.

Presidente: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día ____ de _____ de 2017 en la E.T.S. de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos de la U.P.M.

Acuerda otorgarle la calificación de: _____

Madrid, _____ de _____ de 2017.

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

Sirvan estas líneas como agradecimiento a las personas que han prestado su apoyo y sus sugerencias. Esta tesis no habría sido posible sin su ayuda.

En primer lugar, me gustaría mostrar gratitud hacia mi directora de tesis, María Castro Malpica, Dr. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Ella fue la primera persona que creyó en mí para este trabajo. Esta tesis no existiría de no ser por sus consejos, su paciencia y su incansable dedicación durante estos cuatro últimos años. Estaré siempre en deuda.

Quiero hacer una mención especial a Esperanza Román Mendoza, Profesora Titular en la Universidad George Mason de EEUU. También creyó en mí desde el primer momento y me ha prestado una ayuda por la que quedaré en deuda para siempre.

Sin duda, merecen una mención especial mis compañeras Sagrario Lantarón y Mariló López. También han creído en mí, y su apoyo está resultando fundamental en mi incipiente carrera como profesor de Matemáticas e Informática en la Escuela de Ingenieros de Caminos.

Algunas personas colaboraron prestando su tiempo y sus equipos de manera desinteresada: Luis Iglesias, profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, colaboró en la toma de datos y procesamiento de alguno de los ensayos; Sebastián Almirón, programador, ha desarrollado el software instalador de RoadPlayer y mantiene la versión ejecutable en sus servidores; Carlos Salmerón, responsable de Protección Civil de Morálzarzal, sin su ayuda no habría sido posible el inventariado del Camino Forestal de Matarrubia; Teodoro Rodríguez, amigo, cuyo apoyo e instrumentos de escritura han sido fundamentales para la realización de esta tesis. A los cuatro quiero expresar con estas líneas mi agradecimiento.

Un agradecimiento especial merecen mis hijos Manuel y Lucía, su madre Teresa, y mis hermanos Vicente, Ángel, Antonio, Manuel y Rafael. Todos ellos me han apoyado de manera incondicional.

Es imposible escribir estas líneas sin recordar a mis padres, a los que les habría encantado leerlas.

Por último, quiero dedicar esta tesis a la Comunidad del Software Libre y a todas las personas que hacen posible OpenStreetMap y cada día ceden una parte de su tiempo, de manera altruista, en el convencimiento de que un mundo mejor es posible.

RESUMEN

Los procedimientos actuales para la realización de inventarios de carreteras no dan una solución adecuada para todos los tipos de vías ni para las necesidades de información de todos los agentes interesados en ellas. Esta tesis propone alternativas de bajo coste para algunos de los problemas que se plantean en el inventariado de carreteras y caminos.

En primer lugar, se desarrolla un algoritmo que sincroniza las filmaciones de vídeo con las trazas GNSS de los recorridos. Como aplicación, se desarrollan herramientas informáticas que resuelven el inventario fílmico de cualquier tipo de carretera. Estas herramientas necesitan un postprocesamiento reducido y permiten la utilización de dispositivos de bajo coste.

A continuación se propone un modelo de datos flexible y un formato de almacenamiento basado en estándares abiertos, que permiten gestionar la información de cualquier inventario de carreteras. El modelo de datos propuesto facilita la reutilización de la información y la realización incremental de los inventarios. Se propone, además, un procedimiento de trabajo que permite la utilización de herramientas de código abierto y métodos de trabajo colaborativos.

Por último, se resuelve el problema de la obtención de la geometría del perfil longitudinal de las carreteras. Para ello, se ha desarrollado un algoritmo que proporciona las expresiones analíticas de las alineaciones verticales de dicho perfil a partir del valor de las pendientes longitudinales en los puntos del eje. El algoritmo se integra en un programa de ordenador que incluye una herramienta para la generación de perfiles sintéticos de carreteras con parámetros aleatorios.

Para poner a prueba los algoritmos y procedimientos propuestos se han realizado ensayos utilizando perfiles sintéticos y datos tomados en carreteras, vías ciclistas y caminos forestales. Las tomas de datos en carreteras se han hecho utilizando las propias herramientas desarrolladas en la tesis, datos procedentes de fuentes públicas, de diferentes tipos de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) y de clinómetros.

Los resultados obtenidos en los ensayos demuestran la validez de los algoritmos, herramientas y procedimientos que propone esta tesis doctoral.

ABSTRACT

Current procedures for conducting road inventories provide neither an adequate solution for all types of roads nor all information needs required by all interested parties. This thesis proposes a series of low-cost alternatives for some of the fundamental problems related to the inventory of roads.

First, an algorithm has been developed that synchronizes the video footage with the GNSS path traces. Some computer tools have been developed that use the algorithm and solve the film inventory of any type of road. These tools require a limited amount of postprocessing and allow the use of low-cost devices.

Next, a flexible data model and a storage format based on open standards are proposed to manage the information of any road inventory. This data model facilitates reusing information and conducting inventories in an incremental manner. This thesis also shows a working procedure based on open source tools that allow collaborative working methods.

Finally, a solution to the problem of obtaining the geometry of the longitudinal profile of roads is provided. To this end, an algorithm has been developed that provides analytical expressions of grades and vertical curves through the value of the longitudinal slopes at centerline points. The algorithm is integrated in software that includes a tool for synthetic road profiles with random parameter generation.

In order to check the validity of proposed algorithms and procedures, tests have been carried out using synthetic profiles and data taken from roads, cycling paths, and forest roads. Data collection on roads has been performed using different sources: the tools developed in the thesis, public data sources, different types of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) receivers, and inclinometers.

Results obtained in tests carried out demonstrate the usefulness of the algorithms, tools, and procedures proposed in this doctoral thesis.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Presentación	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodología utilizada	5
1.3.1	Elaboración del estado del arte	5
1.3.2	Desarrollo de algoritmos y aplicaciones de software	6
1.3.3	Toma de datos	7
1.3.3.1	Filmación de las carreteras	7
1.3.3.2	Perfiles sintéticos	7
1.3.3.3	Datos de pendientes de inventarios públicos	8
1.3.3.4	Grabación de trazas GNSS	8
1.3.3.5	Datos procedentes de otras fuentes públicas	8
1.3.4	Procesamiento de los datos	9
1.3.5	Análisis de resultados	9
1.4	Principales aportaciones de la tesis	12
1.5	Estructura del documento	12
2	ESTADO DEL ARTE	15
2.1	Introducción	15
2.2	Inventario fílmico	16
2.2.1	Equipos para filmación en carreteras	16
2.2.2	Formatos para la grabación de las imágenes	23
2.2.3	Soluciones de bajo coste para filmación de vídeo	26
2.3	Utilización de teléfonos móviles	28
2.4	Sistemas de referencia en redes viarias	34
2.4.1	Sistemas de referencia absolutos	34
2.4.2	Sistemas de referencia lineal	39
2.5	Modelos y formatos de datos en inventarios de carreteras	46
2.5.1	Modelos y formatos	46
2.5.2	Diseño y toma de datos en inventarios	48
2.5.3	Modelos de datos existentes	50
2.5.4	Formatos para el almacenamiento de datos	53
2.5.5	El modelo y formato de datos de OpenStreetMap	58
2.6	Reconstrucción de la geometría del trazado	60
2.6.1	Determinación del eje de la carretera	61
2.6.2	Reconstrucción de la geometría de la planta	64
2.6.2.1	Métodos basados en la variación del azimut	67

2.6.2.2	Métodos basados en aproximaciones polinómicas	69
2.6.2.3	Métodos basados en el cálculo directo de la curvatura	72
2.6.3	Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal	74
2.7	Conclusiones	78
3	INVENTARIO FÍLMICO.	81
3.1	Introducción	81
3.2	Sincronización de vídeo y GNSS	82
3.2.1	Sincronización directa	84
3.2.2	Sincronización inversa	85
3.2.3	Sincronización de relojes	87
3.3	El formato de datos y la librería GpxParser	88
3.4	Software desarrollado	93
3.4.1	RoadRecorder	95
3.4.2	RoadPlayer	101
3.5	Ensayos realizados	102
3.5.1	Toma de datos	105
3.5.2	Procesamiento de los datos	105
3.5.3	Operaciones básicas de inventario	105
3.5.4	Defectos de perspectiva y pérdidas de trazado	108
3.5.5	Cálculo del eje	110
3.5.6	Ensayo de cálculo del eje en la carretera M-607	112
3.5.7	Ensayo de cálculo del eje en la carretera M-633	113
3.6	Conclusiones	117
4	MODELO DE DATOS Y CASOS DE ESTUDIO	119
4.1	Introducción	119
4.2	Descripción del modelo de datos	121
4.2.1	Información temática: etiquetas (<i>tags</i>)	122
4.2.2	Elementos <i>Node</i>	125
4.2.3	Elementos <i>Way</i>	126
4.2.4	Elementos <i>Relation</i>	128
4.3	Base de datos mínima	130
4.4	Referencia lineal	131
4.4.1	La línea de referencia	131
4.4.2	Elementos puntuales	135
4.4.3	Elementos lineales	136
4.5	Segmentación dinámica	137
4.6	Definición de la geometría de la carretera	138

4.6.1	Trazado en planta	139
4.6.2	Perfil longitudinal	140
4.6.3	Sección transversal	142
4.6.4	Firmes, visibilidad, gálibo y otras variables	142
4.7	Variación dinámica y utilización de varios idiomas	144
4.8	Metodología incremental para realización de inventarios	146
4.9	Casos de estudio	149
4.9.1	Carretera M-607	150
4.9.1.1	Toma de datos	150
4.9.1.2	Procesamiento de los datos	150
4.9.1.3	Resultados	151
4.9.2	Camino forestal de Matarrubia	153
4.9.2.1	Toma de datos	154
4.9.2.2	Procesamiento de los datos	155
4.9.2.3	Resultados	156
4.9.3	Vía ciclista en Cambridgeshire	159
4.9.3.1	Toma de datos	159
4.9.3.2	Procesamiento de los datos	160
4.9.3.3	Resultados	160
4.9.4	Vía ciclista en Sydney (Australia)	162
4.9.5	Línea de autobús en Ashdod (Israel)	164
4.9.6	Camino de Santiago	165
4.10	Conclusiones	167

5 RECONSTRUCCIÓN DEL PERFIL

LONGITUDINAL	169
5.1	Introducción 169
5.2	Geometría del perfil longitudinal de una carretera 171
5.3	Integración del perfil de pendientes 176
5.4	Algoritmo de reconstrucción 177
5.4.1	Clasificación de los puntos de la muestra 181
5.4.2	Agrupación de puntos consecutivos del mismo tipo 184
5.4.3	Selección de los puntos frontera entre rasantes 184
5.4.4	Cálculo del perfil de pendientes 186
5.4.5	Ajuste del diagrama de pendientes 187
5.4.6	Integración del diagrama dependientes 189
5.4.7	Parámetros que afectan a los resultados de la reconstrucción 190
5.5	Descripción del software desarrollado 194
5.6	Generador de perfiles sintéticos 196
5.7	Ensayos con perfiles sintéticos 199

5.7.1	Cálculo de errores	201
5.7.2	Análisis de resultados	201
5.8	Ensayos con el perfil longitudinal del proyecto	206
5.8.1	Toma de datos	206
5.8.2	Procesamiento de los datos	207
5.8.3	Presentación de resultados y cálculo de errores	208
5.9	Ensayos con datos de clinómetros	211
5.9.1	Toma de datos	211
5.9.2	Procesamiento de los datos	212
5.9.3	Presentación de resultados y cálculo de errores	213
5.9.4	M-607, tramo completo de 50 km	214
5.9.5	Carretera M-607, tramo de 12 km entre Colmenar Viejo y Cerceda	216
5.9.6	N-320, tramo de Torrelaguna a Venturada (Madrid)	218
5.9.7	N-403, tramo de Toledo a Rieves (Toledo)	219
5.9.8	N-403, tramo de Casas del Burguillo a El Barraco	221
5.10	Ensayos con datos de receptores GNSS	223
5.10.1	Toma de datos	223
5.10.2	Procesamiento de los datos	225
5.10.3	Presentación de resultados y cálculo de errores	226
5.10.4	Carretera M-607 (GPS Topcon)	226
5.10.5	Carretera M-607 (GPS Leica)	228
5.10.6	Carretera M-607 (GPS Garmin)	231
5.10.7	Carretera M-607 (teléfono móvil con RoadRecorder)	233
5.10.8	Carretera M-633 (teléfono móvil con RoadRecorder)	235
5.10.9	Carretera M-513 (teléfono móvil con RoadRecorder)	239
5.10.10	Carretera M-325 (GPS Topcon)	242
5.11	Análisis de resultados	244
5.11.1	Resultados en función del tipo de dispositivo	244
5.11.2	Resultados en función del tipo de terreno	246
5.12	Conclusiones	248
6	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	251
6.1	Conclusiones	251
6.2	Futuras líneas de investigación	254
7	REFERENCIAS	255
	Anexos	277

A	Descripción de las opciones del programa RoadPlayer	279
B	Resultados de los casos de estudio de inventarios del capítulo 4	285
B.1	Inventario de la carretera M-607	285
B.2	Inventario del Camino Forestal de Matarrubia	288
B.3	Inventario de vía ciclista en Cambridgeshire	293
B.4	Inventario de vía ciclista de Shutherland a Taren Point	295
B.5	Inventario de la línea de autobús número 66 en Ashdod	297
B.6	Inventario de un tramo del Camino de Santiago	299
C	Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales	301
C.1	M-607: Estado de alineaciones de proyecto	302
C.2	Reconstrucción M-607: datos de proyecto	304
C.3	Reconstrucción M-607: pendientes, tramo 50 km	306
C.4	Reconstrucción M-607: pendientes, tramo 12 km	313
C.5	Reconstrucción N-320: pendientes MFOM	315
C.6	Reconstrucción N-403: pendientes MFOM, Toledo	317
C.7	Reconstrucción N-403: pendientes MFOM, Ávila	319
C.8	Reconstrucción M-607: GNSS Topcon	321
C.9	Reconstrucción M-607: GNSS Leica	325
C.10	Reconstrucción M-607: GNSS Garmin	331
C.11	Reconstrucción M-607: Teléfono móvil + RoadRecorder	335
C.12	Reconstrucción M-633: Teléfono móvil + RoadRecorder	340
C.13	Reconstrucción M-513: Teléfono móvil + RoadRecorder	345
C.14	Reconstrucción M-325: GNSS Topcon	353

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Programas para teléfonos móviles que ofrecen la posibilidad de geotiquetar vídeos y fotografías	25
2.2	Modelos de <i>Action Cam</i> disponibles en el mercado (<i>TechRadar</i> , 2017)	27
2.3	Programas para gestión de sensores en teléfonos móviles	30
2.4	Códigos EPSG de los principales Sistemas de Referencia utilizados en España	38
3.1	Requerimientos de almacenamiento de 1 segundo de grabación de vídeo, en función de la resolución y del ratio <i>fps</i>	100
3.2	Datos de las grabaciones realizadas con RoadRecorder en la carretera M-513	106
3.3	Datos de los hitos kilométricos de la carretera M-513	109
3.4	Defectos de perspectiva en la carretera M-513, en el sentido ascendente	112
3.5	Descripción de las trazas utilizadas en el cálculo del eje de la carretera M-607 (Trazas grabadas con un teléfono móvil utilizando el programa RoadRecorder)	113
3.6	Errores en el cálculo del eje de la carretera M-607 a partir de dos trazas procedentes del receptor GNSS de un teléfono móvil	115
3.7	Descripción de las trazas utilizadas en el cálculo del eje de la carretera M-633 (Trazas grabadas con un teléfono móvil utilizando el programa desarrollado en la tesis RoadRecorder)	115
5.1	Distancias entre puntos de las muestras y rectas de interpolación utilizadas en los ensayos sobre perfiles sintéticos para cada tipo de perfil	200
5.2	Descripción del ensayo de reconstrucción en la carretera M-607 con datos del perfil longitudinal del proyecto	208
5.3	Resultados del ensayo de reconstrucción en la carretera M-607 con datos del perfil longitudinal del proyecto	209
5.4	Tramos de carretera ensayados a partir de datos tomados con clinómetros.	212
5.5	Datos de los sensores utilizados en la toma de datos de pendientes del inventario del MFOM de 2008 (<i>Ministerio de Fomento</i> , 2009a).	212
5.6	Descripción de los ensayos de reconstrucción realizados a partir de datos tomados con clinómetros	213

5.7	Resultados de los ensayos de reconstrucción realizados con datos tomados con clinómetros	215
5.8	Tramos de carretera ensayados con datos procedentes de receptores GNSS.	223
5.9	Descripción de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Topcon GR-3 con corrección diferencial	227
5.10	Resultados de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Topcon GR-3 con corrección diferencial	227
5.11	Descripción de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Leica Geosystem 500	229
5.12	Resultados de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Leica Geosystem 500	229
5.13	Descripción de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Garmin GPSMap 64S	232
5.14	Resultados de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Garmin GPSMap 64S	232
5.15	Descripción de los ensayos de reconstrucción en la M-607 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII	235
5.16	Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-607 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII	235
5.17	Descripción de los ensayos de reconstrucción en la M-633 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII	237
5.18	Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-633 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII	238
5.19	Descripción de los ensayos de reconstrucción en la M-513 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII	240
5.20	Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-513 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII	241
5.21	Descripción del ensayo de reconstrucción de la M-325, traza grabada con un receptor GNSS Topcon con corrección diferencial	243
5.22	Resultados del ensayo de reconstrucción de la M-325, traza grabada con un receptor GNSS Topcon con corrección diferencial	243

5.23 Resultados medios de los errores obtenidos en los ensayos de reconstrucción con datos de diferentes tipos de dispositivos	245
5.24 Resultados del ensayo de reconstrucción de la N-403, como un único tramo y subdividiendo en tres tramos	248

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Esquema de la metodología seguida para la elaboración de la tesis .	11
2.1	Comparación del coste entre distintos métodos de toma de datos para inventarios de carreteras (<i>Jalayer et al.</i> , 2014) (En inglés en el original)	17
2.2	Comparación del hardware de cuatro unidades Mobile Mapping System (<i>Khattak et al.</i> , 2000) (En inglés en el original)	18
2.3	Comparación de horas de trabajo en campo y en gabinete y del coste de adquisición de equipos utilizando levantamiento topográfico y utilizando vehículos MMS (<i>Khattak et al.</i> , 2000) (En inglés en el original)	21
2.4	Comparación de los resultados obtenidos en el inventariado de diferentes elementos mediante levantamiento topográfico y mediante vehículos MMS (<i>Khattak et al.</i> , 2000) (En inglés en el original) . . .	22
2.5	Imágenes correspondientes a los trabajos de estimación del estado de los taludes en las carreteras de Missouri llevadas a cabo por Youssef et al. (2007)	23
2.6	Imágenes correspondientes a la experiencia llevada a cabo en las carreteras de Uganda (<i>Kayondo et al.</i> , 2011)	24
2.7	Relación de sensores de los dispositivos Android (<i>Gajjar</i> , 2017) (En inglés en el original)	28
2.8	Esquema de ejes de referencia para las mediciones obtenidas con los sensores de un dispositivo <i>Android</i> (<i>Google</i> , 2016)	29
2.9	Coordenadas geodésicas en el elipsoide. λ =Longitud; ϕ =Latitud (<i>Instituto Geográfico Nacional</i> , 2017)	35
2.10	Localización de un elemento mediante referencia lineal absoluta (<i>Comité Técnico AEN/CTN</i> , 2012)	40
2.11	Localización de un elemento mediante referencia lineal relativa (<i>Comité Técnico AEN/CTN</i> , 2012)	41
2.12	Localización de un elemento lineal mediante la localización de su origen y su final (<i>Comité Técnico AEN/CTN</i> , 2012)	41
2.13	Localización mediante referencia lineal de un elemento situado a cierta distancia de la línea de referencia (<i>Comité Técnico AEN/CTN</i> , 2012)	42
2.14	Utilización de «segmentación dinámica» para definir los valores de varias propiedades relativas al estado de una carretera (<i>Environmental Systems Research Institute</i> , 2016)	42

2.15	Tipos de hitos kilométricos utilizados en las carreteras españolas a lo largo de la historia. a) Millario de Nerón. b) Antiguos hitos de granito. c) y d) Hitos utilizados en la actualidad y que se describen en la «Norma 8.1 IC: Señalización Vertical» (<i>Ministerio de Fomento</i> , 2014)	44
2.16	Ejemplo de datos brutos obtenidos por el vehículo de toma de datos y utilizados como entrada del algoritmo de reconstrucción (<i>Drakopoulos and Örnek</i> , 2000)	68
2.17	Filtrado de datos mediante una banda de tolerancia (<i>Cafiso and Graziano</i> , 2008)	70
2.18	Error entre la curvatura impuesta y la procedente de la aproximación por <i>splines</i> (<i>Cafiso and Graziano</i> , 2008)	71
2.19	Azimut bruto vs azimuth neto del tramo de la carretera CV-35 [Tuéjar - Titaguas] (<i>Pérez Zuriaga</i> , 2012)	74
2.20	Geometría de los acuerdos asimétricos considerados en el trabajo de Easa y Kikuchi (TA = traditional asymmetrical, EAA = equal-arc asymmetrical. (<i>Easa and Kikuchi</i> , 2009))	77
3.1	Problema inicial de la sincronización inversa: selección del punto más próximo dentro de la trayectoria del móvil a un punto dado	87
3.2	Esquema de la clase T Serie encargada de gestionar las posiciones asociadas a los tiempos dentro de un <i>track</i>	91
3.3	Esquema de los interfaces necesarios para la sincronización directa y la sincronización inversa	91
3.4	Controles del programa <i>RoadPlayer</i> implicados en la sincronización directa e inversa	92
3.5	Detalle de la fijación del teléfono móvil al retrovisor del vehículo mediante gomas elásticas	96
3.6	Pantallas proporcionadas en las distintas secciones del programa <i>RoadRecorder</i> . a) : pantalla principal; b) : pantalla de ajuste de opciones; c) : pantalla de ayuda, d) : instrucciones de fijación del teléfono móvil al retrovisor	99
3.7	Controles e informaciones ofrecidas en la pantalla principal de la aplicación <i>RoadRecorder</i>	100
3.8	Proyección de las trazas de la M-513 sobre la ortofotografía del IGN	104
3.9	M-513: Pantalla de RoadPlayer en el momento de alcanzar la posición del PK-14	107
3.10	M-513: Proyección sobre el mapa del IGN de la posición del PK-14 .	108

3.11	M-607: Proyección sobre ortofotografía de la traza del eje calculado y de la línea de la carretera procedente del IGN, donde se muestra que la línea del IGN (en trazo continuo) no sigue el trazado actual de la carretera	109
3.12	Fotograma de pérdida de orientación en el PK8+180 de la M-513 sentido ascendente	110
3.13	Fotograma de pérdida dinámica de trazado en el PK14+380 de la carretera M-513 en sentido ascendente	111
3.14	Carretera M-607: visualización de las trazas empleadas en el cálculo del eje de la carretera y de la traza resultado (Trazas grabadas con un teléfono móvil utilizando el programa desarrollado en la tesis RoadRecorder)	114
3.15	Carretera M-633: visualización de las trazas empleadas en el cálculo del eje de la carretera y de la traza resultado (Trazas grabadas con un teléfono móvil utilizando el programa desarrollado en la tesis RoadRecorder)	116
4.1	Ejemplo de etiquetado para un elemento de señalización vertical . . .	123
4.2	Ejemplo de etiquetado para un elemento calle de un inventario de un municipio	124
4.3	Ejemplo de elemento <i>tag</i> codificado en XML	124
4.4	Ejemplo de elemento tipo <i>Node</i> en codificación XML	125
4.5	Ejemplo de elemento tipo <i>Node</i> en codificación OSM-XML	126
4.6	Ejemplo de elemento tipo <i>Way</i> en codificación XML	128
4.7	Ejemplo de un elemento <i>Relation</i> que define un <i>MultiPolygon</i> que representa una superficie con dos huecos (<i>OpenStreetMap</i> , 2013) . .	129
4.8	Estructura de la base de datos mínima para implementar el modelo de datos	131
4.9	Ejemplo básico de elemento <i>Relation</i> utilizado para definir una línea de referencia	132
4.10	Ejemplo de etiquetado alternativo para definir una línea de referencia mediante un elemento <i>Relation</i>	133
4.11	Ejemplo de <i>Route</i> incluyendo el <i>Node</i> origen del tramo, para referenciación lineal mediante distancias absolutas	133
4.12	Ejemplo de <i>Route</i> incluyendo como miembros los <i>Nodes</i> correspondientes a los hitos kilométricos	134
4.13	Ejemplo de etiquetado de un <i>Node</i> que hace de hito kilométrico de determinada línea de referencia	134
4.14	Ejemplo de elemento <i>Relation</i> que define un hito kilométrico	135

4.15 Ejemplo de etiquetado de un <i>Node</i> cuya localización se fija mediante distancia absoluta al origen del tramo	136
4.16 Ejemplo de etiquetado de un <i>Node</i> cuya localización se fija mediante distancia a un hito kilométrico	136
4.17 Ejemplo de etiquetado de un elemento lineal del tipo <i>Way</i> que representa una barrera de contención cuya localización se fija mediante referenciación a los hitos kilométricos	137
4.18 Ejemplo de elementos <i>Relation</i> para definir el ancho de un camino mediante segmentación dinámica	138
4.19 Ejemplo de elementos <i>Relation</i> correspondientes a un tramo del perfil longitudinal de una carretera	141
4.20 Variables que definen la sección en una carretera (<i>Ministerio de Fomento, 2009c</i>)	143
4.21 Ejemplo de etiquetado en una sección con la altura máxima limitada	144
4.22 Ejemplo de elemento <i>Way</i> etiquetado en varios idiomas (<i>Coast, 2004</i>)	145
4.23 Fuentes de datos y esquema del procesado de la información	147
4.24 Edición de señales de tráfico de la carretera M-607 con el programa JOSM	151
4.25 Elementos de inventario de señalización vertical en la M-607	152
4.26 Plano de situación del Camino de Matarrubia que da acceso al cerro de Cabeza Mediana en Moralarzal	153
4.27 Filmación en el camino de Matarrubia. a) Vehículo todo-terreno perteneciente a la agrupación de Protección Civil de Moralarzal utilizado para la filmación. b) Detalle de la fijación del teléfono móvil al retrovisor del vehículo.	154
4.28 Camino de acceso al Cerro de Cabeza Mediana. a) Trabajos de aplicación de plaguicida. b) Detalle del camino, del cauce lateral y de grieta producida por fallo del drenaje	157
4.29 a) Detalle de paso canadiense para impedir el paso de ganado. b) Fuente del Retén	157
4.30 a) Comedero cinegético. b) Acopio de material combustible	158
4.31 a) Torre eléctrica de alta tensión. b) El autor de la tesis junto al vértice geodésico El Pinar	158
4.32 Mapa de situación de la vía ciclista de Cambridgeshire en East Anglian (Inglaterra)	159
4.33 Inventario de una vía ciclista en Cambridgeshire	161
4.34 Mapa de situación de la vía ciclista de Sutherland a Taren Point, en Sydney (Australia)	162

4.35	Detalles de la vía ciclista de Sutherland a Taren Point. a) Cruce con la calzada para automóviles. b) Señalización horizontal	163
4.36	Línea de autobús número 66 de Ashdod (Israel) con indicación de las paradas	163
4.37	Detalle de elementos Node de la línea de autobús número 66 de Ashdod (Israel)	164
4.38	Tramo del Camino de Santiago para acceso por el norte a Santiago de Compostela (España)	166
4.39	Detalle de elementos Node del Camino de Santiago (España)	166
5.1	a) Perfil longitudinal; b) Diagrama de pendientes	174
5.2	a) Perfil longitudinal; b) Área encerrada entre dos abscisas del diagrama de pendientes como diferencia de cotas en el perfil longitudinal	177
5.3	a) Perfil longitudinal; b) Diagrama de pendientes	179
5.4	Diagrama de flujo del algoritmo de reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal	182
5.5	Rectas de interpolación anterior, (r_1) , y posterior, (r_2) , de un punto P_i	183
5.6	a) Recta de interpolación posterior de un punto (2) situado a la izquierda del punto frontera (1) de separación entre rasantes. b) Recta de interpolación anterior de un punto (3) situado a la derecha del punto frontera (1) de separación entre rasantes	185
5.7	Sustitución de dos rectas horizontales del diagrama de pendientes por una única recta (g'_1, g'_2) que encierre el mismo área	188
5.8	Sustitución por rectas de área equivalente en el diagrama de pendientes: caso I	189
5.9	Sustitución por rectas de área equivalente en el diagrama de pendientes: caso II	189
5.10	Sustitución por rectas de área equivalente en el diagrama de pendientes: caso III	190
5.11	Perfiles sintéticos tipo considerados en las series de ensayos	197
5.12	Esquema de las fases que comprende la realización de cada ensayo sobre un perfil sintético	199
5.13	Media del valor absoluto del error en la determinación de los puntos frontera entre rasantes en los ensayos sobre perfiles de los tipos I a IV, con rectas de interpolación formadas por tres puntos	202
5.14	Máximo del valor absoluto del error en la determinación de los puntos frontera entre rasantes en los ensayos sobre perfiles de los tipos I a IV, con rectas de interpolación formadas por tres puntos	203

5.15	Media del valor absoluto del error en la determinación de los puntos frontera entre rasantes en los ensayos sobre perfiles de los tipos V a VIII, con rectas de interpolación formadas por tres puntos	204
5.16	Máximo del valor absoluto del error en la determinación de los puntos frontera entre rasantes en los ensayos sobre perfiles de los tipos V a VIII, con rectas de interpolación formadas por tres puntos	205
5.17	Carretera M-607, tramo entre Colmenar Viejo y Cerceda. Plano de situación	207
5.18	Resultados del ensayo de reconstrucción en la carretera M-607 con datos del perfil longitudinal del proyecto. Diagrama de pendientes . .	210
5.19	Resultados del ensayo de reconstrucción en la carretera M-607 con datos del perfil longitudinal del proyecto. Perfil longitudinal	211
5.20	Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal del tramo de 50 km de la M-607 con datos de clinómetros: diagrama de pendientes .	216
5.21	Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal del tramo de 50 km de la M-607 con datos de clinómetros: perfil longitudinal	216
5.22	Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo de 12 km de la M-607 con datos de clinómetros: diagrama de pendientes	217
5.23	Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo de 12 km de la M-607 con datos de clinómetros: perfil longitudinal . . .	218
5.24	Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo de 8 km de la N-320 con datos de clinómetros: diagrama de pendientes	219
5.25	Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo de 8 km de la N-320 con datos de clinómetros: perfil longitudinal	220
5.26	Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo llano de 15 km de la N-403 con datos de clinómetros: diagrama de pendientes	220
5.27	Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo llano de 15 km de la N-403 con datos de clinómetros: perfil longitudinal	221
5.28	Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo montañoso de 12 km de la N-403 con datos de clinómetros: diagrama de pendientes	222
5.29	Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo montañoso de 12 km de la N-403 con datos de clinómetros: perfil longitudinal	222
5.30	a) Detalle de la fijación de la antena GPS al techo del automóvil. b) Detalle de la fijación del receptor GPS en el vértice geodésico de La Ollera	224

5.31	Resultados de los ensayos de reconstrucción de la carretera M-607 con un GPS Topcon GR-3 con corrección diferencial: diagrama de pendientes	228
5.32	Resultados de los ensayos de reconstrucción de la carretera M-607 con un GPS Topcon GR-3 con corrección diferencial: perfil longitudinal	228
5.33	Resultados de los ensayos de reconstrucción de la carretera M-607 con un GPS Leica Geosystem 500. Diagrama de pendientes	230
5.34	Resultados de los ensayos de reconstrucción de la carretera M-607 con un GPS Leica Geosystem 500: perfil longitudinal	231
5.35	Resultados de los ensayos de reconstrucción de la M-607 con un GPS Garmin GPSMap 64S. Diagrama dependientes, ensayo número	2233
5.36	Resultados de los ensayos de reconstrucción de la carretera M-607 con un GPS Garmin GPSMap 64S. Perfil longitudinal, ensayo número	2234
5.37	Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-607 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Diagrama de pendientes	236
5.38	Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-607 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Perfil longitudinal . .	236
5.39	Carretera M-633, de Cabanillas de la Sierra a Valdemanco (Madrid). Plano de situación	237
5.40	Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-633 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Diagrama de pendientes	238
5.41	Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-633 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Perfil longitudinal . .	239
5.42	Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-513 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Diagrama de pendientes	241
5.43	Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-513 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Perfil longitudinal . .	242
5.44	Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-325 a partir de una traza obtenida con un receptor GNSS Topcon con corrección diferencial. Diagrama de pendientes	244
5.45	Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-325 a partir de una traza obtenida con un receptor GNSS Topcon con corrección diferencial. Perfil longitudinal	244
A.1	Pantalla principal de la aplicación <i>RoadPlayer</i>	279
A.2	<i>RoadPlayer</i> : informe «Diagrama de pendientes»	282

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AENOR	: Asociación Española de Normalización y Certificación
BIM	: Building Information Modeling
CAD	: Computer Aided Design
CSV	: Comma Separated Values
DGT	: Dirección General de Tráfico
ED50	: European Datum de 1950
EOBD	: European On Board Diagnostic
EPSG	: European Petroleum Survey Group
ESRI	: Environmental Systems Research Institute, Inc.
ETRS89	: European Terrestrial Reference System 1989
EUREF	: European Reference Organisation for Quality Assured Breast Screening and Diagnostic Services
FM	: Frecuencia modulada
<i>fps</i>	: Fotogramas por segundo (<i>frames per second</i>)
GDAL	: Geospatial Data Abstraction Library
GML	: Geographic Markup Language
GNSS	: Global Navigation Satellite System
GPS	: Global Positioning System
GPX	: GPS Exchange Format
GDAL	: Geospatial Data Abstraction Library
IAG	: International Association of Geodesy
IAU	: International Astronomical Union
INSPIRE	: Infrastructure for Spatial Information in Europe
ISO	: International Organization for Standarization
J2ME	: Java Platform Micro Edition
JOB	: Japanese On Board Diagnostic
JPEG	: Joint Photographic Experts Group
KML	: Keyhole Markup Language
MFOM	: Ministerio de Fomento (Gobierno de España)
MIRE	: Model Inventory of Roadway Elements
MMS	: Mobile Mapping System
OBD	: On Board Diagnostic
OGC	: Open Geospatial Consortium
OSGeo	: Open Source Geospatial Foundation
OSM	: OpenStreetMap

PEIT	: Plan Estratégico de Infraestructuras de Transporte
RDS	: Radio Data System
REGCAN	: Red Geodésica de Canarias
REGENTE	: Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales
RSS	: Rich Site Summary
RTK	: Real Time Kinematic
SAE	: Society of Automotive Engineers
SGWC	: Sistema de Gestión Web de Carreteras
SIG	: Sistema de Información Geográfica
UTM	: Universal Transversal Mercator
W3C	: World Wide Web Consortium
WGS84	: World Geodetic Survey 1984

NOTACIÓN

a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}	: Componentes de la aceleración del punto i según las direcciones de los ejes coordenados
α_{lim}	: Ángulo asociado a la pendiente límite
a_0, a_1, a_2	: Parámetros de las ecuaciones analíticas
β	: Ángulo de la recta de interpolación con el eje X
Desv.	: Desviación típica
ECM	: Error cuadrático medio
ϕ	: Latitud geográfica
fps	: Fotogramas por segundo
g	: Pendiente longitudinal de un punto del eje de la carretera
G	: Número de rasantes de pendiente constante
K_v	: Parámetro de los acuerdos parabólicos
λ	: Longitud geográfica
p_i	: Presión barométrica en el punto i
n	: Número de orden del fotograma
s	: Distancia al origen medida a lo largo de la carretera
t_0	: Tiempo de inicio de las grabaciones de vídeo y GNSS
VC	: Número de rasantes del tipo acuerdo parabólico
x_i, y_i, z_i	: Coordenadas del punto i
z	: Altitud

MAGNITUDES

bit	: 0 ó 1
byte	: 8 bits
kilobyte	: 1024 bytes
megabyte	: 1024 kilobytes
km	: Kilómetro
m	: Metro
s	: Segundo
v	: Voltio

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PRESENTACIÓN

Las redes de carreteras son una de las «*infraestructuras críticas*» de los países (Moteff and Parfomak, 2004). Afectan directamente a la calidad de vida de los ciudadanos y a la productividad de las empresas. La gestión eficiente de cualquier red de carreteras y caminos necesita una descripción detallada de sus características, a fin de facilitar el proceso de toma de decisiones y obtener el máximo rendimiento de las inversiones realizadas. Para poder alcanzar este objetivo, es necesario disponer de un inventario detallado que incluya las características de la vía, de los elementos que la componen y de su estado actual de mantenimiento y conservación. El objetivo de los inventarios de carreteras es proporcionar una herramienta de gestión y toma de decisiones a los diferentes agentes implicados en la planificación y explotación de las redes carreteras y caminos.

Los inventarios de carreteras se pueden definir como una base de datos acerca de las vías, sus elementos y sus características. Hay diferentes tipos de inventarios de carreteras: los inventarios físicos, los aforos de tráfico, los datos sobre los accidentes ocurridos durante la explotación, las inspecciones visuales y auscultaciones de los firmes y su capa de rodadura, los inventarios de estructuras y otros (Kraemer et al., 2009).

Esta tesis se refiere a los «*inventarios físicos*» de las carreteras y redes viarias en general, a los que se denominará en adelante simplemente por la palabra «*inventarios*», si bien, los conceptos y procedimientos desarrollados son de aplicación, en mayor o menor medida, a cualquiera de los otros tipos de inventarios.

En un sentido amplio, los *inventarios físicos* consisten en una base de datos documental que puede incluir, no solo anotaciones, sino también planos, mapas, vídeos, fotografías y otros documentos de interés al objeto del mismo.

Los procedimientos y equipos destinados a los inventarios de carreteras convencionales están muy desarrollados. No sucede lo mismo con los inventarios destinados a otros tipos de redes viarias, como los caminos forestales, las vías ciclistas y pedestres o las rutas turísticas por parajes naturales. Estas redes de caminos necesitan ser utilizadas para distintos tipos de tráficos, cada uno de los

cuales con sus características y necesidades específicas. Se trata de gestionar tráfico de personas, vehículos y mercancías para su explotación, el mantenimiento y mejora de las instalaciones y la atención a situaciones de emergencias.

La expresión «*bajo coste*» utilizada en el título de la tesis debe entenderse en el sentido amplio de la palabra coste. El coste de un determinado procedimiento de realización de inventarios tiene tres componentes: (1) un coste monetario correspondiente a la adquisición de los equipos necesarios, (2) un coste derivado de la necesidad de utilizar personal especializado para la realización de las tareas asociadas con el inventario y (3) un coste en tiempo, que abarca el periodo desde el momento de tomar la decisión de hacer un determinado inventario hasta el momento en que los datos de dicho inventario están publicados y disponibles para su utilización. El coste de un recurso siempre es relativo a la disponibilidad del mismo en el lugar y momento de requerirse su utilización. La magnitud de cualquiera de estas tres componentes del coste de un inventario es, por lo tanto, relativa a la disponibilidad de las mismas en el lugar y momento en el que se vaya a realizar el inventario. Así, por ejemplo, en los entornos de los países más desarrollados y en condiciones normales de uso, la disposición de modernos vehículos del tipo *Mobile Mapping Systems* y de técnicos especializados en la realización de inventarios puede tener costes competitivos y disponibilidad inmediata. En cambio, en regiones menos desarrolladas, la disposición de ese tipo de recursos puede ser prácticamente imposible. También hay que tener en cuenta que, en situaciones de emergencias creadas tras catástrofes, la componente tiempo es crítica, y la imposibilidad de disponer de equipos y personal especializado en el tiempo requerido puede convertir estos recursos en inutilizables a los efectos de la realización de los inventarios correspondientes.

Un inventario debe ser fiable y para ello tiene que estar actualizado. La necesidad de actualización implica un coste de mantenimiento. La frecuencia de actualización se convierte en crítica cuando, tras una catástrofe natural, situaciones de guerra, accidentes industriales u otros tipos de catástrofes antropogénicas, la red viaria de un territorio queda destruida o inutilizable. En este tipo de situaciones, los equipos de protección civil necesitan conocer el estado de las vías en tiempo real, al objeto de optimizar la distribución de asistencia a la población. La necesidad de dar respuesta en las primeras horas o días tras este tipo de catástrofes hace que los procedimientos actuales utilizados para el inventariado de carreteras convencionales no den una solución satisfactoria en estos casos.

La hipótesis defendida en esta tesis es que los inventarios de carreteras y caminos no está adecuadamente resueltos con los procedimientos actuales. En el caso de los inventarios de las carreteras tradicionales para automóviles utilizados

por parte de las autoridades y las empresas encargadas de su construcción, mantenimiento y explotación, existen equipos y aplicaciones informáticas que pueden ser de utilidad en entornos de altos recursos. En cambio, hay numerosos casos donde las soluciones actuales para la realización de los inventarios de carreteras y caminos son totalmente inadecuadas. Incluso en el caso mencionado anteriormente de las carreteras convencionales para automóviles, los modelos de datos utilizados suponen un hándicap importante para la reutilización de la información y el desarrollo de nuevas aplicaciones y usos de los citados inventarios. Como se ha mencionado, un caso de especial importancia y que no está convenientemente resuelto a día de hoy, es el inventario de todo tipo de vías durante las labores posteriores a las catástrofes naturales.

A lo largo de esta tesis, se detallan algunos de los aspectos que se consideran mal resueltos a día de hoy, en relación con los inventarios de carreteras y caminos. También se proponen algunas soluciones que resuelven de manera más adecuada los problemas que se plantean durante la realización de los inventarios, no solo de las carreteras tradicionales para automóviles en países desarrollados, sino también para resolver los inventarios de carreteras y caminos en regiones con pocos recursos, o los inventarios de vías para usos específicos, como pueden ser las vías ciclistas, las vías pedestres, los caminos forestales utilizados por los servicios de emergencias y los inventarios de todo tipo de vías tras catástrofes naturales o de otro tipo. Se pondrá especial atención a las soluciones basadas en herramientas y recursos de bajo coste, así como a las soluciones que se pueden beneficiar del trabajo colaborativo de personal no especializado en la realización de inventarios, soluciones cuya aplicación a situaciones de catástrofes naturales se ha demostrado de enorme utilidad.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis doctoral es estudiar las posibilidades que ofrecen los procedimientos y herramientas de bajo coste para la realización y mantenimiento de los inventarios de carreteras y caminos.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos concretos:

1. Desarrollar un algoritmo de sincronización directa e inversa entre las filmaciones de vídeo y las trazas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de las carreteras
2. Desarrollar herramientas informáticas que permitan resolver el inventario fílmico de cualquier carretera utilizando dispositivos de bajo coste
3. Proponer un modelo de datos y un formato de almacenamiento de la información que den una solución adecuada a cualquier tipo de inventario de vías
4. Desarrollar un algoritmo para la reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de las carreteras

En relación con el modelo de datos, se considerará que la solución es adecuada si verifica los siguientes extremos:

- El formato de datos tiene que estar basado en estándares de código abierto existentes
- El modelo de datos tiene que ser flexible y adaptable a cualquier tipo de inventario de carreteras
- Los inventarios resultantes se tienen que poder integrar con las herramientas SIG existentes
- El modelo de datos tiene que incorporar la referencia lineal y la segmentación dinámica siguiendo las prescripciones de la norma ISO 19148
- El modelo de datos tiene que permitir la descripción de la geometría de la carretera: planta, perfil longitudinal y sección transversal
- El modelo de datos tiene que permitir la elaboración de inventarios sin una planificación previa detallada, mediante un proceso incremental y técnicas de trabajo colaborativo

1.3 METODOLOGÍA UTILIZADA

Dentro del contexto general de las *herramientas de bajo coste para inventarios de carreteras*, esta tesis doctoral aborda tres temas concretos: los inventarios fílmicos, los modelos de datos y la reconstrucción de la geometría del eje de la carretera. En los tres temas ha sido necesario el desarrollo de herramientas específicas que permitieran la realización posterior de los correspondientes ensayos sobre el terreno.

Se describen a continuación las fases que se han seguido para la consecución de los objetivos planteados en la tesis.

1.3.1 Elaboración del estado del arte

En primer lugar se realizó un estudio de las publicaciones existentes en relación con los temas objeto de investigación. Los resultados de este estudio se exponen en el capítulo 2. En particular, se analizó la documentación disponible en relación con los siguientes temas:

- *Inventarios fílmicos*: procedimientos utilizados para la realización de inventarios fílmicos de carreteras convencionales, formatos de vídeo utilizados, procedimientos para la georreferenciación de vídeos y fotografías y procedimientos de bajo coste ensayados
- *Aplicaciones para teléfonos móviles*: programas para teléfonos móviles de última generación y otros dispositivos de bajo coste que pueden ser de utilidad para la realización o el mantenimiento de los inventarios de carreteras
- *Modelos de datos*: modelos de datos estándares para inventarios de carreteras y estándares abiertos de almacenamiento de información que se pueden utilizar para los mismos
- *Sistemas de referencia*: sistemas de referencia absolutos y relativos utilizados para fijar la localización de los elementos de los inventarios de carreteras, sistemas de referencia geodésicos para fijar las coordenadas geográficas y normas de estandarización existentes para referencia lineal y segmentación dinámica
- *Reconstrucción del trazado*: procedimientos desarrollados y publicados para la reconstrucción de la geometría del trazado en planta y del perfil longitudinal de las carreteras

1.3.2 Desarrollo de algoritmos y aplicaciones de software

A la vista del estado actual de la investigación en los temas tratados se decidió desarrollar tres aplicaciones de software que permitieran alcanzar los objetivos de la tesis:

- *RoadRecorder*: aplicación para teléfonos móviles con sistema operativo *Android* que permite grabar de manera sincronizada el vídeo del recorrido de una carretera y la información procedente del GPS (*Global Positioning System*) y diversos sensores
- *RoadPlayer*: aplicación para ordenadores personales que permite la reproducción sincronizada de los vídeos y los datos tomados con la aplicación *RoadRecorder* y con otras cámaras o dispositivos GNSS independientes
- *Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal*: aplicación para ordenadores personales que permite la obtención de las ecuaciones analíticas de las alineaciones que componen el perfil longitudinal de una carretera, a partir de los datos de las pendientes longitudinales del eje de la misma

Para poder realizar estas aplicaciones ha sido necesario desarrollar previamente formatos de datos y librerías de procedimientos que permitieran su funcionamiento:

- *Formato de datos GpxParser*: formato de datos para almacenamiento sincronizado de trazas GNSS y sensores
- *Librería de procedimientos GpxParser*: procedimientos de sincronización entre vídeos y trazas GNSS, cálculo de proyecciones UTM e importación y exportación de los datos entre diferentes formatos SIG (*Sistemas de Información Geográfica*)
- *TrackMap*: librería para gestionar y visualizar cartografía y trazas GNSS en pantalla
- *XYVectorFunction*: procedimientos para el tratamiento de vectores y matrices con gran número de elementos
- *MathUtil*: librería de utilidades matemáticas. Incluye resolución de sistemas de ecuaciones lineales, aproximaciones por mínimos cuadrados, cálculo de agregados estadísticos, resolución analítica y numérica de derivadas e integrales, así como otros cálculos necesarios para el funcionamiento de los programas
- *FunctionDisplay*: librería que permite realizar gráficos de una o más funciones discretas en la forma $y_i = f(x_i)$
- *IOUtil*: librería de utilidades para lectura y escritura de ficheros en diferentes

formatos

- *ExifUtil*: librería con procedimientos para manipular el geoetiquetado de fotografías

Además, de manera independiente, se desarrolló una extensión del formato de datos estándar *OSM* (*OpenStreetMap*) que permite implementar el modelo de datos para inventarios propuesto por la tesis.

Todos los programas y librerías de procedimientos se desarrollaron siguiendo la técnica *Test Driven Development* y requirieron la realización de pruebas de funcionamiento y tests unitarios para cada una de las funciones que implementan.

Tanto las aplicaciones mencionadas como las librerías auxiliares desarrolladas se describen con detalle en los capítulos 3, 4 y 5.

1.3.3 Toma de datos

La prueba de los programas, algoritmos y procedimientos desarrollados se realizó mediante ensayos con datos de distinta procedencia:

1.3.3.1. Filmación de las carreteras

Utilizando el programa *RoadRecorder* se realizó la filmación, la grabación de la traza GNSS y la grabación del valor de los sensores en cuatro carreteras españolas de calzada única y doble sentido de circulación y en un camino forestal. El teléfono móvil se fijó en el retrovisor del automóvil tal y como se explica en el apartado 3.4.1.

Algunos de los recorridos se seleccionaron ex profeso para el análisis con el programa *RoadPlayer* de los defectos de perspectiva del trazado, como en el caso de la carretera M-513, tramo entre Boadilla del Monte y Brunete, que se explica en el apartado 3.5.4.

1.3.3.2. Perfiles sintéticos

Para la puesta a punto del algoritmo de reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal, se ha desarrollado una aplicación para ordenadores de escritorio que permite generar perfiles longitudinales de carreteras con parámetros aleatorios adaptables a las normativas de diferentes países. Se han ensayado 120 000 perfiles sintéticos con parámetros aleatorios y diferentes tipologías.

El generador de perfiles aleatorios se explica en el apartado 5.6. Los ensayos realizados se detallan en el apartado 5.7.

1.3.3.3. Datos de pendientes de inventarios públicos

Algunos de los ensayos del algoritmo de reconstrucción se hicieron con datos de pendientes procedentes de inventarios públicos de geometría de las carreteras. La toma de datos procedía de clinómetros. Con el fin de validar el algoritmo en diferentes situaciones, se escogieron tramos con diferente tipología: terreno llano, terreno ondulado y terreno montañoso. Los tramos de carretera ensayados fueron los siguientes:

- N-320 Tramo: Torrelaguna - Venturada. PK 333+000 al 340+900 (Madrid) (terreno ondulado)
- N-403 Tramo: Toledo - Rielves. PK 5+000 al 20+000 (Toledo) (terreno llano)
- N-403 Tramo: Casas del Burguillo - El Barraco. PK 96+000 al 108+000 (Ávila) (terreno montañoso)
- M-607 Tramo del PK 8+630 al PK 58+380 (Madrid) (terreno ondulado)

Las tres primeras carreteras son de titularidad estatal y los datos proceden del inventario de características geométricas del Ministerio de Fomento (MFOM). La carretera M-607 es de titularidad autonómica, en concreto de la Comunidad Autónoma de Madrid.

1.3.3.4. Grabación de trazas GNSS

Se registraron trazas GNSS de diferentes tramos de carreteras y de un camino forestal utilizando diferentes modelos de receptores: teléfonos móviles, receptor GPS *Garmin* de bajo coste y receptores GPS profesionales de gama alta (*Topcon* y *Leica*). En dos de los ensayos se utilizó corrección diferencial RTK (*Real Time Kinematic*) con apoyo de una estación en tierra. Estos últimos dispositivos GPS mencionados no pueden considerarse de bajo coste.

Al efecto de comprobar el funcionamiento del algoritmo de reconstrucción, se eligieron tramos de carreteras con diferentes características del perfil longitudinal: terreno llano, terreno ondulado y terreno de montaña.

La descripción detallada de las características de cada ensayo se hace en el capítulo 5 y en los anexos de la tesis.

1.3.3.5. Datos procedentes de otras fuentes públicas

En algunos casos se han utilizado datos, fundamentalmente cartografía, procedente de fuentes públicas. Es el caso de las ortofotografías del Plan Nacional

de Ortofotografía Aérea (PNOA) y de las capas vectoriales de las carreteras, todo ello procedente del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

Para algunos de los ejemplos utilizados en el capítulo 4, dedicado al modelo de datos para inventarios de carreteras, se ha utilizado información procedente de la base de datos de *OpenStreetMap*.

1.3.4 Procesamiento de los datos

El programa de reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal utiliza como entrada de datos un fichero en formato CSV con las distancias al origen del tramo, s_i , y las pendientes g_i de los puntos del eje de la carretera. En todos los casos en los que los datos provienen de receptores GNSS, lo que se tienen son coordenadas (x_i, y_i, z_i) de los puntos del eje, no pendientes. Se hizo el cálculo del perfil longitudinal en la forma (s_i, z_i) y de la muestra de pendientes en la forma (s_i, g_i) , a partir de estas coordenadas. El programa de reconstrucción tiene una utilidad que genera los ficheros CSV con los perfiles (s_i, z_i) y (s_i, g_i) a partir del fichero CSV con las coordenadas (x_i, y_i, z_i) según se explica en el apartado 5.2.

Cuando los datos de origen no estaban en el sistema de referencia ETRS89 fue necesario hacer una reproyección de los mismos.

En el caso de las trazas de recorridos grabadas con el programa *RoadRecorder*, el propio programa entrega los datos en formatos GPX (*GPS Exchange Format*) y CSV (*Comma Separated Values*) y con las coordenadas de los puntos en la proyección UTM del sistema de referencia ETRS89.

1.3.5 Análisis de resultados

En los ensayos de filmación de carreteras con *RoadRecorder*, se utilizó el programa *RoadPlayer* para la visualización de los recorridos y la extracción de información en diferentes formatos. El resultado del programa de reconstrucción son las expresiones analíticas de las alineaciones que forman el perfil longitudinal.

En el caso de los ensayos llevados a cabo con perfiles sintéticos se conocen las expresiones analíticas del perfil longitudinal original de la carretera y la posición exacta de los puntos frontera entre las distintas alineaciones. Se calcularon la media, el máximo, la desviación típica y el error cuadrático medio que se cometía en la determinación de las cotas del perfil longitudinal reconstruido y en la posición de la abscisa s de los puntos frontera entre alineaciones. Los resultados se detallan en el apartado 5.7.

En el caso de los ensayos en carreteras reales, no se conocen las alineaciones del perfil longitudinal original de la carretera ni sus expresiones analíticas ni la posición de los puntos frontera entre las diferentes alineaciones. Para calcular los errores que se cometen en la reconstrucción, se compararon las cotas de los puntos que se obtienen a partir del perfil longitudinal «*reconstruido*» con las cotas de los puntos en el perfil longitudinal «*original*» de la carretera. El perfil original que se utilizó para la comparación se obtuvo mediante la integración numérica de los datos de las pendientes. Dicha integración numérica de las pendientes la realiza el programa de reconstrucción y se explica en el apartado 5.3.

A partir de esta comparación de cotas se determinan varios errores:

- Media del valor absoluto del error en las cotas de los puntos
- Máximo del valor absoluto del error en las cotas de los puntos
- Varianza y desviación típica del valor absoluto del error en las cotas de los puntos
- Error cuadrático medio en las cotas de los puntos

Al tratarse de reconstrucciones hechas a partir de datos procedentes de diferentes carreteras y diferentes dispositivos y con el fin de extraer conclusiones, se han hecho comparaciones de los errores entre diferentes tipos de dispositivos y entre carreteras situadas en distinto tipo de terreno (llano, ondulado o montañoso), para diferentes valores de la separación entre los puntos de las trazas y para diferentes valores de los parámetros que utiliza el algoritmo de reconstrucción y que se explican en el apartado 5.4.7: «*pendiente límite*» y «*longitud de las rectas de interpolación*». Las conclusiones extraídas a lo largo de la tesis y del análisis de los resultados se detallan en los apartados 3.6, 4.10 y 5.12, así como en el capítulo 6.

En la figura 1.1 se muestra de manera esquematizada la metodología seguida en el desarrollo de esta tesis doctoral.

METODOLOGÍA

Fig. 1.1: Esquema de la metodología seguida para la elaboración de la tesis

1.4 PRINCIPALES APORTACIONES DE LA TESIS

La tesis aborda diferentes aspectos en relación con los inventarios físicos de carreteras. En particular, se estudian los procedimientos de inventariado de bajo coste, los inventarios de vías diferentes de las carreteras tradicionales para automóviles, los inventarios para cualquier agente interesado en los mismos y los inventariados de vías tras catástrofes naturales o antropogénicas.

En el capítulo tercero, se desarrolla un algoritmo que permite la sincronización entre trazas GNSS y filmaciones de vídeo. Además, se presentan dos aplicaciones de software desarrolladas que permiten la filmación de las carreteras y las trazas GNSS mediante teléfonos móviles, y su posterior reproducción y análisis en ordenadores personales. Los ensayos realizados permiten comprobar la utilidad de este tipo de dispositivos de bajo coste en la realización de los inventarios de todo tipo de vías.

En el capítulo cuarto se presenta un modelo de datos para inventarios de carreteras y su correspondiente formato de almacenamiento. El modelo de datos presentado permite la realización de cualquier tipo de inventario en cualquier tipo de vía y para su uso por parte de cualquier agente interesado en el mismo. El modelo de datos propuesto permite la realización de los inventarios mediante procedimientos incrementales que no requieren una detallada planificación previa ni un periodo largo de aprendizaje por parte del personal encargado de su realización. Este aspecto es de gran utilidad en la realización de inventarios de emergencia tras catástrofes naturales y en los casos en los que los inventarios se realizan con personal no especializado.

Por último, el capítulo quinto presenta un algoritmo que permite la reconstrucción de la geometría de las distintas rasantes que componen el perfil longitudinal de una carretera, a partir de los datos de las pendientes longitudinales a lo largo de su recorrido. Los ensayos realizados demuestran la validez del algoritmo utilizando tanto datos procedentes de clinómetros como datos procedentes de trazas GNSS. La precisión alcanzada supera la obtenida anteriormente por otros autores.

1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento está estructurado en siete capítulos y tres anexos. El capítulo segundo se dedica a establecer el estado del arte en las cuestiones que afectan a la investigación: inventarios fílmicos, posibilidades que ofrecen los teléfonos móviles de última generación, sistemas de referencia utilizados en los inventarios,

modelos de datos empleados en el almacenamiento de la información y algoritmos para la reconstrucción de la geometría del eje de las carreteras.

En el tercer capítulo se aborda el tema de la sincronización de las filmaciones de vídeo con las trazas GNSS de los recorridos y se muestran el algoritmo de sincronización y las aplicaciones que se han desarrollado para dar solución al inventariado fílmico de cualquier tipo de carretera mediante la utilización de dispositivos de bajo coste. Se muestran los resultados de los ensayos llevados a cabo en tres tramos de carreteras convencionales.

El cuarto capítulo propone un modelo de datos abierto y flexible que permite resolver cualquier tipo de inventario, integrar los inventarios en las herramientas SIG existentes y utilizar métodos de trabajo incremental y colaborativo. El modelo de datos permite describir todas las variables utilizadas habitualmente en los inventarios de carreteras convencionales, implementar las prescripciones acerca de la referencia lineal y la segmentación dinámica de la norma ISO 19148 y describir la geometría de la carretera (planta, perfil longitudinal y sección transversal). También permite describir las variables del inventario de cualquier tipo de vía y la utilización simultánea de varios idiomas en un mismo inventario. Se analizan seis casos de estudio: un tramo de la carretera M-607 y el camino forestal de acceso al cerro Mediana en la provincia de Madrid, un tramo del Camino de Santiago en Galicia, una vía ciclista en Cambridgeshire (Reino Unido), una vía ciclista en Shutherland (Australia) y una línea de autobús en Ashdod (Israel).

El quinto capítulo propone un algoritmo que permite la reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de las carreteras a partir del valor de la pendiente longitudinal en los puntos del eje. Este capítulo también explica la herramienta desarrollada para la generación de perfiles sintéticos aleatorios. Se analizan los resultados de los más de 120000 ensayos realizados con perfiles sintéticos y de los ensayos realizados en ocho tramos de carreteras españolas en servicio.

El sexto capítulo está dedicado a detallar las conclusiones extraídas de este trabajo y a sugerir futuras líneas de trabajo e investigación en relación con el tema de la tesis.

El capítulo séptimo incluye la lista de referencias bibliográficas citadas a lo largo de la tesis.

Por último, como se ha indicado, se han añadido tres anexos. El anexo A explica de manera detallada las opciones del programa RoadPlayer (3.4.2), que forma parte de los desarrollos de la tesis. El anexo B contiene ejemplos de elementos correspondientes a los casos de estudio del capítulo 4. El anexo C contiene los resultados completos de los ensayos de reconstrucción de la

geometría de perfiles longitudinales abordados en el capítulo 5.

NOTA

A LO LARGO DE LA TESIS SE REMITE AL LECTOR A DISTINTOS ENLACES WEB PARA ACCEDER AL REPOSITORIO DE CÓDIGO DE LA TESIS, A LOS ENLACES DE DESCARGA DE LOS EJECUTABLES DE LOS PROGRAMAS DESARROLLADOS Y OTROS. CON EL FIN DE FACILITAR EL ACCESO A DICHAS DIRECCIONES WEB SIN TENER QUE COPIARLAS DEL TEXTO, SE HA HABILITADO UNA PÁGINA WEB QUE CONTIENE TODOS LOS ENLACES, DE FORMA QUE SE PUEDA ACCEDER A ELLOS SIMPLEMENTE «PINCHANDO» EN EL ENLACE. LA DIRECCIÓN DE LA PÁGINA DE ENLACES ES:

<http://mercatorlab.com/tesis>

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Los datos correspondientes a un inventario de carreteras se registran y almacenan en formatos informáticos. Hay datos de carácter alfanumérico, que se gestionan con la ayuda de software específico para bases de datos. También hay datos gráficos en forma de planos o dibujos que requieren un tratamiento particular dentro de dichas bases de datos. Por último, hay imágenes, en forma de fotografías o filmaciones de vídeo, correspondientes a los distintos tramos de las carreteras y a sus elementos constituyentes. Esto último se ha dado en denominar el «*inventario fílmico*» de la carretera, y es un elemento de gran valor, tanto para la realización del inventario, como para su mantenimiento y explotación. El segundo apartado de este capítulo está dedicado a establecer el estado del arte actual en relación con la realización de inventarios fílmicos para carreteras y, en particular, los realizados con técnicas y equipos de bajo coste y los destinados a carreteras y otros tipos de vías.

Los teléfonos móviles de última generación disponen de sensores ambientales y de movilidad, posibilidad de conexión a redes y gran capacidad de cómputo. Esto permite desarrollar aplicaciones que los convierten en herramientas valiosas como apoyo en la realización y mantenimiento de los inventarios. Su bajo coste relativo y la facilidad de disponer de ellos en cualquier territorio o circunstancias permite que sean utilizados en entornos de pocos recursos o en los trabajos relacionados con el inventariado de vías tras catástrofes naturales o de otro tipo. También es posible su utilización por parte de personal no especializado en labores de inventariado. A estos dispositivos y a las posibles herramientas basadas en ellos se dedica el tercer apartado del capítulo.

Para registrar correctamente todos los elementos que componen un inventario es necesaria la definición de un sistema de referencia que permita identificar de manera inequívoca cada uno de los elementos que componen dicho inventario. El cuarto apartado del capítulo se dedica a detallar el estado del arte en relación con los sistemas de referencia habitualmente utilizados en carreteras.

Los modelos de datos utilizados por los inventarios de carreteras afectan directamente a su facilidad de uso y mantenimiento y a la posibilidad de reutilización de la información. La gran variedad de tipos y de usos posibles de los inventarios de carreteras hacen muy difícil, si no imposible, la creación a priori de un modelo de datos que incluya todas las variables que se necesitan en las

distintas situaciones o por parte de los distintos agentes interesados en los inventarios. En el quinto apartado de este capítulo se analiza el estado del arte en relación con los modelos de datos que se utilizan actualmente para resolver los problemas relacionados con el inventariado de las vías.

La geometría del eje de las carreteras es un elemento fundamental de los inventarios y de los estudios de seguridad vial. Las localizaciones de todos los elementos del inventario se suelen referir al eje. No es frecuente disponer de la información de la geometría de dicho eje en carreteras ya construidas, bien porque no se puede acceder a los documentos del proyecto de la carretera o porque, durante su construcción o a lo largo del tiempo, la carretera ha sufrido modificaciones de trazado que no quedaron adecuadamente reflejadas en la documentación disponible. Se puede obtener información del eje a partir de cartografía, imágenes de satélite u ortofotos, aunque en estos casos no siempre están disponibles con la precisión requerida o suficientemente actualizadas. También es posible recorrer la vía en un vehículo dotado de un dispositivo GNSS y proceder a la determinación de la geometría del eje mediante algoritmos matemáticos. El sexto apartado de este capítulo se dedica a detallar el estado del arte en cuanto a los algoritmos y procedimientos existentes a día de hoy para la determinación de la geometría del eje de las carreteras, tanto de su trazado en planta como de su trazado en alzado.

El último apartado del capítulo está dedicado a detallar las conclusiones que se han extraído durante el establecimiento del estado del arte.

2.2 INVENTARIO FÍLMICO

2.2.1 Equipos para filmación en carreteras

En los últimos años, los vídeos y fotografías digitales han sustituido a la tecnología analógica basada en el revelado o en las cintas de vídeo que se utilizaban anteriormente. La tecnología digital ha favorecido un abaratamiento de los costes de los equipos y de los del procesado, almacenamiento y distribución de las imágenes. A día de hoy, la filmación en vídeo de las carreteras o la realización de fotografías equiespaciadas a lo largo de su recorrido es uno de los procedimientos más utilizados para la toma de datos de los inventarios. Jalayer et al. realizaron una encuesta entre los departamentos de transporte de los cincuenta estados de Estados Unidos y de siete provincias de Canadá. Indican en su estudio que hasta el 41 % de los organismos consultados lo utilizaban. Entre las ventajas que señalan está una menor exposición al tráfico del personal y la reducción de los tiempos

necesarios para la toma de datos, al trasladar al gabinete algunos de los trabajos que de otra manera habría que hacer sobre el terreno. Jalayer et al. realizaron también una comparativa de los costes de distintos métodos para la toma de datos. El resultado de dicho análisis se muestra en la figura 2.1, donde se puede ver que la toma de datos mediante vídeos o fotografías es el procedimiento más económico de entre los analizados (*Jalayer et al.*, 2014). Por su parte, Degray y Hancock señalan algunas ventajas más del procedimiento, como la posibilidad de compartir la información a través de redes informáticas, la facilidad de realizar copias y la posibilidad de utilizar las imágenes en procesos judiciales que involucren las características de la carretera en determinada fecha (*Degray and Hancock*, 2002).

Fig. 2.1: Comparación del coste entre distintos métodos de toma de datos para inventarios de carreteras (*Jalayer et al.*, 2014) (*En inglés en el original*)

Methods	Type of Segment Selected	Capability of Collecting HSM-related Roadside Features	Total Length (mi)	Total Data Collection Time (man-hr)	Total Data Reduction Time (man-hr)	Total Time (man-hr/mi)	Total Cost (\$/mi)
Photo/Video Log	1, 2, 3, 4	Some	28.0	4.0	23.0	0.96	\$72
Satellite/Aerial Imagery	1, 2, 3, 4	Some	7.0	---	10.0	1.43	\$107
Mobile LiDAR	1, 2, 3, 4	All	14.2	8.0	70.0	5.50	\$915
GPS Data Logger	2, 3, 4	All	1.3	6.0	3.5	7.31	\$700
Robotic Total Station	1, 3, 4	All	1.3	13.0	3.5	12.70	\$1,075

(Note: 1= rural multi-lane highways; 2= freeway segment; 3= rural two-lane highway; 4= urban/suburban arterials)

Las casas comerciales utilizan vehículos especialmente habilitados para la toma de datos de los inventarios de carreteras. Dichos vehículos van dotados de cámaras para la toma de fotografías y vídeos, además de diversos tipos de sensores para la toma de datos. Estos vehículos, en sus versiones más actuales, se denominan genéricamente como *Mobile Mapping Systems*, *MMS*.

Se utilizan cámaras digitales de gama alta con formatos panorámicos y un ángulo de visión de al menos 120°. Es habitual que el vehículo que recorre la vía disponga de más de una cámara, por ejemplo una enfocando en el sentido de la marcha y la otra enfocando hacia atrás, de forma que se puedan recoger imágenes de elementos orientados en el sentido contrario al de la marcha. También se pueden disponer cámaras que filmen directamente el estado de los pavimentos. En cualquier caso, en carreteras de una calzada y doble sentido de circulación, es conveniente realizar una filmación para cada sentido. En algunos casos, los equipos de filmación van dotados de mecanismos que corrigen automáticamente la

orientación de la cámara en las curvas, en función del ángulo de giro del vehículo utilizado para la filmación. Khattak et al. hicieron un estudio comparativo de cuatro vehículos MMS. La figura 2.2 reproduce la tabla del trabajo de Khattak et al. que muestra las características del hardware de las cuatro unidades MMS que utilizaron en el estudio. En la tabla se detallan las características de los equipos GNSS, las cámaras, los sistemas de navegación inercial y los dispositivos para medir distancias (Khattak et al., 2000).

Fig. 2.2: Comparación del hardware de cuatro unidades Mobile Mapping System (Khattak et al., 2000) (En inglés en el original)

Collection method	GPS receiver	Digital camera (pixel resolution)	INS	DMI
MMS1	Trimble 7400	Pulnix (768×484)*	Litton*	Daytron*
MMS2	Ashtech Z-12	COHO 4980 RS-170 (640×480)	Honeywell Laser Ref III	Vehicle ABS
MMS3	Novatel*	Sony XC-007 (640×480)	INS with 3 gyros and 2 accelerometers	Vehicle ABS
MMS4	Leica MX 9212	Sony DXC 9000 (559×494)	Litton Laser Gyro	Hengstler R158-T/1800

* Exact make or model is proprietary information.

INS = inertial navigation system

DMI = distance measuring instrument

El último inventario de carreteras estatales de España se realizó en el año 2008 y sus resultados se publicaron en el año 2009. No se utilizaron filmaciones de vídeo, sino fotografías tomadas cada diez metros. Las imágenes frontales se tomaron mediante tres cámaras fotográficas situadas en la parte delantera del vehículo (formato panorámico). En post-proceso estas imágenes se unieron, dando como resultado una imagen panorámica con un ángulo de visión de 130°. En este caso la corrección automática en curvas no fue necesaria, ya que con este sistema se captan las imágenes de la carretera y su entorno, incluso para curvas muy cerradas. La imagen trasera (formato estándar) se tomó mediante una cámara situada en la parte posterior izquierda del vehículo de forma que se pudieran captar las imágenes en sentido opuesto al movimiento del vehículo. De esta forma, la información de la señalización del carril descendente quedó solucionada en el caso de carreteras convencionales, apoyada por la información de audio que suministraba el operador del equipo. En base a digitalización de voz y a un sistema de activación por voz, el operador del vehículo grababa todas aquellas incidencias no visibles en la imagen capturada, por ejemplo las señales en sentido inverso al de circulación, los textos de señales informativas, etc. La resolución de las imágenes fue de 750 x 600 píxeles para el formato estándar y 2200 x 576 píxeles para el formato panorámico (Ministerio de Fomento, 2009a,c).

El vehículo que se utilizó en ese inventario de carreteras fue un monovolumen adaptado. Disponía de cuatro ordenadores conectados a través de una doble red local Ethernet gobernada por un ordenador principal con la misión de controlar el sistema, de proporcionar la interfaz con el usuario y de almacenar y grabar todas las imágenes. Para optimizar el equipo, se destinó un ordenador auxiliar de máximas prestaciones de velocidad a la captación y empaquetado de imágenes JPEG, otro a la grabación digital del audio y un cuarto a la adquisición de las características geométricas de la carretera. Además de las tomas de fotografías ya mencionadas, el vehículo, a través de diferentes sensores y dispositivos, registraba los siguientes parámetros (*Ministerio de Fomento, 2009b*):

- *Medición de distancias de recorrido*: las medidas de las distancias en cada tramo se realizaron mediante un odómetro de alta precisión. Los autores del estudio afirman que se cometía un error inferior a 0,7 m/km
- *Radios de curvatura*: se obtuvieron mediante un giróscopo de fibra óptica de alta resolución KVH DSP-3000. Los datos de rumbo se tomaron cada 2 m, presentándose los datos de radios cada 10 m. Los autores del estudio afirman que el error máximo que se cometía era del 0,15 % y que obtenían radios de curvatura con errores sensiblemente inferiores al 5 %
- *Pendientes longitudinales*: para la medición automática de los ángulos verticales, se utilizaron clinómetros de alta precisión de la marca Sensorex. Los datos se tomaron cada 2 m, almacenándolos cada 10 m mediante la media de los 5 datos anteriores. El error máximo de estos equipos, según los autores del estudio, fue de $\pm 0,1$ %
- *Peraltes*: al igual que en el caso de las pendientes longitudinales, para la medición de los peraltes se utilizaron clinómetros de alta precisión. El error máximo de estos equipos, siempre según descripción de los autores del estudio, fue de $\pm 0,1$ %. Los datos se tomaron cada 2 m, almacenándolos cada 10 m mediante la media de los 5 datos anteriores
- *Anchuras de calzada y plataforma*: se realizó con mediciones reales sobre la carretera y cotejo posterior en gabinete con las fotografías. Asignan un error máximo de ± 15 cm.
- *Coordenadas de la carretera*: se utilizó un dispositivo GPS con corrección diferencial que, según afirman los autores del estudio, proporcionaba soluciones con errores máximos de 20 cm en planta. Para el caso de la coordenada Z, se combinaron más de un aparato para obtener un valor de la altura de la carretera en un elevado número de puntos y con una precisión alta. Las posibles carencias de datos del GPS, se subsanaron en gabinete, apoyándose en los datos de rumbo tomados por el giróscopo de fibra óptica cada 2 m.

Sin embargo, como se verá en el capítulo 5, la precisión de las medidas en los tramos de carretera estudiados no es tan alta como se afirma en el informe del inventario. Es posible que los errores nominales de los dispositivos que utilizaron sí fueran los que indican en el informe, pero los resultados del trabajo arrojan errores mayores, ya sea por el postproceso o por la interpretación de los datos de un mismo parámetro hechos a partir de la medida de diferentes dispositivos.

Los vehículos del tipo *MMS* que se utilizan habitualmente para la realización de los inventarios fílmicos tienen un coste muy elevado y son complejos de utilizar. Khattak et al. (2000) hacen una comparativa del coste de adquisición de los equipos necesarios para realizar levantamientos topográficos y de los de adquisición de vehículos *MMS*. El resultado de la comparación se puede ver en la figura 2.3, que reproduce la tabla que aparece en el trabajo de Khattak et al. y en la que indican que el coste de los vehículos *MMS* es unas diez veces superior al de los equipos de levantamiento topográfico. El postprocesamiento de los datos que registran los *MMS* es complejo. En la misma tabla se puede ver la comparación entre las horas de trabajo en gabinete que se requieren para el caso de levantamiento topográfico y para el caso de utilización de los *MMS*. Según se indica en la tabla, ambos procedimientos dedican aproximadamente la misma cantidad de horas totales. En el caso del levantamiento topográfico se utilizan más horas sobre el terreno y en el caso de los *MMS* se utilizan más horas de gabinete. Es importante indicar que más horas sobre el terreno implican mayores riesgos laborales para el personal (Khattak et al., 2000).

Aunque actualmente hay equipos de menor tamaño, los vehículos *MMS* están pensados mayormente para tomar medidas sobre carreteras pavimentadas y para anchuras de carretera destinadas a vehículos automóviles, lo que dificulta la toma de medidas en otros tipos de vías. Este es el caso de las vías ciclistas, los caminos forestales, las carreteras muy deterioradas, las vías pedestres y las rutas turísticas. En general, su utilización implica unos costes elevados, un amplio número de instrumentos y una detallada planificación. Esto hace difícil su despliegue rápido en situaciones de emergencia. Tampoco se adaptan bien para la realización de inventarios de carreteras no convencionales, como es el caso de las carreteras no pavimentadas, vías ciclistas, las rutas pedestres, los caminos forestales y otros.

En cuanto a los resultados que se obtienen, Khattak et al. analizaron la precisión obtenida en el inventariado de algunos elementos como la señalización vertical, la iluminación, la anchura de los carriles y otros. La comparación de los resultados globales es favorable al método de levantamiento topográfico frente a los *MMS*. Los resultados de la comparación se pueden ver en la tabla que aparece en la figura 2.4, extraída del trabajo de Khattak et al. (Khattak et al., 2000).

Fig. 2.3: Comparación de horas de trabajo en campo y en gabinete y del coste de adquisición de equipos utilizando levantamiento topográfico y utilizando vehículos MMS (Khattak et al., 2000) (En inglés en el original)

Item	Manual method			MMS1-4		
	Two-lane rural	Rural interstate	Urban	Two-lane rural	Rural interstate	Urban
Mean collection time for 100 inventory elements in the field, including equipment setup and driving the roadway (person-minutes)	38	40	36	7 8 8 6	9 7 8 7	9 10 9 8
Mean in-office processing time for 100 inventory elements (person-minutes)	–	–	–	5*	5*	5*
Mean inventory data extraction time for 100 inventory elements, inputting to computer, and creation of inventory database including transfer to GIS (person-minutes)	45	45	45	76 82 72 84	80 77 76 82	78 80 77 75
Sum of mean collection, processing, and extraction times	83	85	81	87	92	92
One-time purchase of equipment (hardware, software, and peripherals, in dollars)	30,000†			250,000 and above‡		

– = Not applicable
 * = Approximately the same time for all four methods using vehicle systems
 † = Manual method cost includes purchase of vehicle and a computer workstation
 ‡ = The cost of the methods employing vehicle systems depend on the number and type of sensors installed onboard and varies significantly

Según indican Puente et al., los últimos modelos de sensores montados en los vehículos MMS permiten alcanzar precisiones comparables con las del levantamiento topográfico (Puente et al., 2013).

A causa de los elevados costes y la necesidad de personal muy especializado para la utilización de los MMS, algunos organismos internacionales han promovido la utilización de procedimientos y equipos de bajo coste para la realización de los inventarios de carreteras en los países en desarrollo. Se han realizado algunas experiencias de procedimientos de bajo coste para la realización de inventarios fílmicos de carreteras.

Youssef et al. utilizaron una cámara de vídeo montada en el salpicadero de un vehículo para la realización de una evaluación preliminar del estado de los taludes de las carreteras de Missouri, en Estados Unidos. El objetivo era establecer el orden de prioridad de intervención en las labores de mantenimiento de dichos taludes. A partir de medidas realizadas en gabinete sobre las propias fotografías, determinaron diversos parámetros como el ángulo o la altura de los taludes. En la figura 2.5 se puede apreciar, en la parte izquierda, la fijación de la cámara de vídeo sobre el salpicadero del automóvil, mientras que la imagen de la derecha muestra un fotograma en el que se han marcado determinadas medidas que se tomaron,

Fig. 2.4: Comparación de los resultados obtenidos en el inventariado de diferentes elementos mediante levantamiento topográfico y mediante vehículos MMS (Khattak et al., 2000) (En inglés en el original)

Experiment	Environment	Inventory Element									For all elements	Overall
		Lane width	Sign width	Sign lateral placement	Drive-way width	Street light spacing	Barrier height	Sign height	Sign support height	Side slope		
Experiment 1	Two-lane rural	V _{MMS1}	*	*	V _{MMS1}	—	*	*	V _{MMS1}	*	V _{MMS1}	M*
	Rural interstate	V _{MMS1}	V _{MMS1}	M	—	—	*	*	*	*	V _{MMS1}	
	Urban	V _{MMS1}	M	M	V _{MMS1}	V _{MMS1}	—	*	*	—	M*	
Experiment 2	Two-lane rural	*	*	*	*	—	*	*	*	*	V _{MMS2} *	M*
	Rural interstate	*	*	*	—	—	*	*	*	*	V _{MMS2} *	
	Urban	*	*	*	*	*	—	*	*	—	M*	
Experiment 3	Two-lane rural	*	*	*	—	—	—	*	*	—	M	M*
	Rural interstate	*	*	*	—	—	—	*	*	—	V _{MMS3} *	
	Urban	*	*	*	—	—	—	*	*	—	M*	
Experiment 4	Two-lane rural	V _{MMS4}	—	M	M	—	—	—	—	—	M*	M*
	Rural interstate	*†	—	M	—	—	—	—	—	—	M*	
	Urban	V _{MMS4}	—	M	V _{MMS4}	V _{MMS4}	—	—	—	—	M*	

Table legend

— = Not tested

* = Not statistically different at the 95% confidence level

M = Data collected by the manual method are statistically more accurate at the 95% confidence level

V_{MMS1}, V_{MMS2}, V_{MMS3}, V_{MMS4} = Data collected by the particular method are statistically more accurate at the 95% confidence level

† = Shoulder width measured in place of lane width

usando el factor de escala que proporcionaba la medición real de la medida de la anchura de la carretera (Youssef et al., 2007).

Por su parte, Kayondo et al. utilizaron dos cámaras montadas en los laterales de un vehículo todo-terreno. Una de las cámaras tomaba imágenes en color real mientras que la otra tomaba imágenes infrarrojas. El objetivo fue hacer una evaluación previa del estado de los firmes en las carreteras del distrito de Jinja en Uganda. En la figura 2.6 se puede apreciar, en la imagen superior, el detalle de la fijación de las dos cámaras en el parachoques del vehículo todo-terreno. En las dos imágenes inferiores se puede observar la imagen de un bache en la carretera, en la parte izquierda tal como se muestra en las imágenes en color real y, en la parte derecha la imagen en infrarrojo del mismo bache (Kayondo et al., 2011).

En ambos casos, los vehículos iban provistos de GPS y, al menos, un ordenador personal, además de las cámaras de vídeo.

Actualmente existen equipos de filmación estereográfica 3D, sistema de filmación que ha popularizado Google a través de StreetView. Según indican en su página web, su último vehículo dispone de quince cámaras que captan fotografías de 360°. El vehículo también dispone de sensores de movimiento para registrar su

Fig. 2.5: *Imágenes correspondientes a los trabajos de estimación del estado de los taludes en las carreteras de Missouri llevadas a cabo por Youssef et al. (2007)*

posición, una unidad de disco duro para almacenar datos, un ordenador pequeño que ejecuta el sistema y láseres que capturan datos 3D para identificar las distancias en las imágenes de Street View. También han desarrollado equipos de filmación que, en lugar de utilizar un automóvil, van montados en una mochila que puede cargar un operador que se desplaza a pie. Esta técnica ha sido utilizada para la filmación estereográfica en entornos especialmente protegidos, como es el caso de las Islas Galápagos en Chile, donde Google, en colaboración con la Fundación Charles Darwing, el Parque Nacional de las Islas Galápagos y la Universidad de Cuenca (Chile) procedió a la filmación de los caminos, y el entorno marino y submarino del parque natural (Google, 2017; Charles Darwin Foundation, 2014; Google Maps, 2016).

2.2.2 Formatos para la grabación de las imágenes

Las fotografías o las filmaciones de vídeo se almacenan en formatos gráficos *JPEG*. Las resoluciones varían en función de los dispositivos de filmación utilizados (*International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission*, 2004).

En el caso de los inventarios de carreteras, es necesario que las fotografías o los fotogramas individuales correspondientes a una filmación de vídeo estén georreferenciados, de forma que se pueda asignar la localización del tramo de carretera que corresponde a cada fotograma. Con este fin, los vehículos utilizados para las filmaciones están dotados de dispositivos de posicionamiento por satélite GNSS que proporcionan las coordenadas de los puntos del recorrido en un sistema de referencia ligado a la Tierra. Para poder relacionar las fotografías con

Fig. 2.6: Imágenes correspondientes a la experiencia llevada a cabo en las carreteras de Uganda (Kayondo et al., 2011)

los puntos del recorrido es necesario realizar una sincronización entre los datos proporcionados por el dispositivo GNSS y los instantes de cada fotograma.

El proceso consistente en añadir los metadatos de geolocalización a una fotografía, vídeo u otro archivo digital se denomina «*geoetiquetado*» o «*georreferenciación*», en inglés, «*geotagging*». Se utiliza la especificación *Exif*, creada por la *Japan Electronic Industry Development Association* (JEIDA). Las etiquetas (*tags*) de metadatos definidas en el estándar *Exif* cubren un amplio espectro de tipos de información, entre las que se incluyen la fecha y hora,

Tabla 2.1: *Programas para teléfonos móviles que ofrecen la posibilidad de geoetiquetar vídeos y fotografías*

Aplicación	Sistema operativo	Características
Geocam	Android	Geoetiquetado de fotografías, incluyendo orientación y comentarios. Exporta imagen+datos a pdf y KMZ
DailyRoads	Android	Permite grabar vídeos o foto lapse. Geoetiquetado de fotografías y vídeos. No da los datos abiertos
MediaMapper Mobile	Android	Foto lapse + track GPS + datos de sensores. Exporta datos en GPX y KML. Permite geoetiquetar fotografías
Imageotag	Android	Versión menor de MediaMapper Mobile orientada a geoetiquetar fotografías sobre GoogleMaps
TimeLapse	Android	Permite la toma de fotos en modo time lapse. No geoetiqueta las fotografías
Mapillary	Android, iOS	Permite la toma de time lapse georeferenciado. Las series de fotografías se visualizan en OpenStreetMap y JOSM
OpenStreetCam	Android	Otra aplicación para videos georeferenciados en el entorno de OpenStreetMap y JOSM
GeoPaparazzi	Android	Fotografías georeferenciadas con indicación de la orientación de la cámara en el momento de la toma

duración de la grabación, configuración de la cámara, ratio de fotogramas por segundo, posición GPS y otras.

No existe a día de hoy un estándar que permita geoetiquetar un vídeo fotograma a fotograma. *Exif* permite geoetiquetar vídeos (o archivos de sonido), pero no lo hace fotograma a fotograma, sino que asigna una sola posición al vídeo, que se interpretaría en términos de «*dónde se comenzó a filmar el vídeo*».

Las cámaras de fotos digitales, y entre ellas las cámaras de fotos de los teléfonos móviles, añaden metadatos en formato *Exif* a las fotografías, vídeos y

archivos digitales de sonido. En el caso de que el dispositivo disponga de GPS, permiten añadir la información de geolocalización: longitud, latitud y altitud.

Algunos fabricantes de vídeo cámaras proporcionan la posibilidad de geoetiquetar los vídeos. Posteriormente se pueden extraer los metadatos asociados a los fotogramas mediante diversas herramientas (*DVMP*, 2016; *Phil Harvey*, 2017). La utilización de dichos datos para fines de investigación puede presentar dificultades, bien sea por la falta de precisión del dato de posición, o por la falta de información acerca de los formatos de dichos datos o de los procedimientos de sincronización utilizados. Otra posibilidad que ofrecen algunos fabricantes de vídeo cámaras es la de añadir a los vídeos la información de telemetría sobreimpresionada. Los datos de telemetría que añaden son los valores de las coordenadas, velocidad y distancia recorrida.

Se pueden encontrar en Internet portales que ofrecen servicios relacionados con el geoetiquetado de fotografías y vídeos, por ejemplo el popular *Google Street View* (*Google*, 2017). Hay otros portales y aplicaciones que ofrecen soluciones similares, la mayoría de las cuales inciden más en los aspectos relacionados con la grabación del vídeo que en el aspecto de la georreferenciación precisa del mismo. Estas aplicaciones, en general, no utilizan formatos abiertos para el almacenamiento de los datos. En el terreno del software libre y los datos abiertos, cabe destacar *OpenStreetMap*. Existen diversas técnicas para añadir información a la base de datos de *OpenStreetMap*, una de las cuales es el «*Video Mapping*» (*OpenStreetMap*, 2010). Hay dos de aplicaciones para *OpenStreetMap* similares al *Street View* de *Google*: *Mapillary* y *OpenStreetCam* (*Erik Solem et al.*, 2013; *Telenav*, 2016). En la tabla 2.1 se resumen las características de las principales aplicaciones en relación con el geoetiquetado de fotografías y vídeos.

2.2.3 Soluciones de bajo coste para filmación de vídeo

En el contexto de las soluciones de bajo coste para la filmación de las carreteras, existen en el mercado numerosas cámaras de vídeo de pequeño tamaño y altas prestaciones denominadas *action cams*. Estas cámaras se pensaron inicialmente para la filmación de actividades deportivas al aire libre, y disponen de soportes que permiten fijarlas en cualquier vehículo o incluso en el propio casco del deportista. El coste de dichas cámaras está entre 300 y 500 euros. Proporcionan resoluciones de hasta 1080 puntos en horizontal y, las más actuales, la posibilidad de filmación 4K, con resolución de 4000 puntos en horizontal y relaciones de aspecto 17:9. El número de fotogramas por segundo (*fps*) de las filmaciones alcanza los 240 fps, siendo habitual filmar en 60 fps o más.

Tabla 2.2: Modelos de Action Cam disponibles en el mercado (TechRadar, 2017)

Fabricante	Modelo	4K fps	Bat (h)	Peso (gr)	GPS	Sumergible	Euros
GoPro	Hero5 Black	30	3	118	Sí	10 m.	399
Tom Tom	Bandit	15	3	190	Sí	Salpicaduras	178
Olympus	TG-Tracker	30	3	180	Sí	30 m	319
Garmin	Virb XE	No	2	152	Sí	50 m	339
Veho Muvi	K2 NPNG	No	4	84	No	100 m	247
iSaw	Edge	10	2	64	No	40 m	150
Sony	FDR-X1000V	30		110	Sí	30 m	536

Estas cámaras, montadas sobre el salpicadero de un vehículo automóvil o sobre el manillar de una motocicleta o bicicleta, permiten la filmación de todo tipo de vías. Por su pequeño tamaño y facilidad de operación permiten que cualquier agente interesado pueda realizar la filmación de una carretera o camino, sin apenas planificación ni conocimientos especializados acerca de los inventarios de carreteras.

Actualmente casi todos los fabricantes de vídeo cámaras tienen algún modelo del tipo *action cam*. Algunos de ellos disponen de GPS incorporado y ofrecen en sus portales de internet la posibilidad de visualizar los vídeos a la vez que se observa la posición del móvil sobre la cartografía (*GoPro*, 2017; *Sony*, 2017). En la tabla 2.2 se muestran las características de los modelos más populares de *action cams* disponibles actualmente en el mercado. Las columnas de la tabla indican el fabricante, el modelo, el ratio de fotogramas por segundo que ofrecen en grabación 4K, la duración de las baterías, el peso, si disponen o no de GPS, la capacidad de resistencia al agua y el precio aproximado en euros. La duración de las baterías y la resistencia al agua son detalles a tener en cuenta si se piensa en instalar la cámara en el exterior del vehículo de filmación. También han entrado en la comercialización de las filmaciones de carreteras los fabricantes de navegadores para automóviles (*Garmin*, 2016).

Otro campo en el que las cámaras de pequeño tamaño están ofreciendo soluciones es el de la filmación en 360 grados. Los mismos fabricantes de las *action cam* disponen de modelos capaces de realizar filmaciones en 360° de los recorridos. En el caso de las filmaciones para carreteras, la filmación a 360° obliga a montar la cámara en la parte superior del vehículo, lo que complica su utilización.

Fig. 2.7: *Relación de sensores de los dispositivos Android (Gajjar, 2017) (En inglés en el original)*

Sensor	Type	Description	Common Uses
TYPE_ACCELEROMETER	Hardware	Measures the acceleration force in m/s^2 that is applied to a device on all three physical axes (x, y, and z), including the force of gravity	Motion detection (shake, tilt, etc.)
TYPE_AMBIENT_TEMPERATURE	Hardware	Measures the ambient room temperature in degrees Celsius. See note below	Monitoring air temperatures
TYPE_GRAVITY	Software or hardware	Measures the force of gravity in m/s^2 that is applied to a device on all three physical axes (x, y, and z)	Motion detection (shake, tilt, etc.)
TYPE_GYROSCOPE	Hardware	Measures a device's rate of rotation in rad/s around each of the three physical axes (x, y, and z)	Rotation detection (spin, turn, etc.)
TYPE_LIGHT	Hardware	Measures the ambient light level (illumination) in lux	Controlling screen brightness
TYPE_LINEAR_ACCELERATION	Software or hardware	Measures the acceleration force in m/s^2 that is applied to a device on all three physical axes (x, y, and z), excluding the force of gravity	Monitoring acceleration along a single axis
TYPE_MAGNETIC_FIELD	Hardware	Measures the ambient geomagnetic field for all three physical axes (x, y, and z) in μT	Creating a compass
TYPE_ORIENTATION	Software	Measures degrees of rotation that a device makes around all three physical axes (x, y, and z). As of API Level 3 you can obtain the inclination matrix and rotation matrix for a device by using the gravity sensor and the geomagnetic field sensor in conjunction with the <code>getRotationMatrix()</code> method	Determining device position
TYPE_PRESSURE	Hardware	Measures the ambient air pressure in hPa or mbar	Monitoring air pressure changes
TYPE_PROXIMITY	Hardware	Measures the proximity of an object in cm relative to the view screen of a device. This sensor is typically used to determine whether a handset is being held up to a person's ear	Phone position during a call
TYPE_RELATIVE_HUMIDITY	Hardware	Measures the relative ambient humidity in percent	Monitoring dew point, absolute, and relative humidity
TYPE_ROTATION_VECTOR	Software or hardware	Measures the orientation of a device by providing the three elements of the device's rotation vector	Motion detection and rotation detection
TYPE_TEMPERATURE	Hardware	Measures the temperature of the device in degrees Celsius. This sensor implementation varies across devices and this sensor was replaced with the TYPE_AMBIENT_TEMPERATURE sensor in API Level 14	Monitoring temperatures

2.3 UTILIZACIÓN DE TELÉFONOS MÓVILES

Los teléfono móviles de alta gama, también conocidos como *smartphones*, están equipados con una serie de sensores ambientales y de movimiento que los convierten en una plataforma de sensores de bajo coste. Aunque la denominación habitual en España sea la de «teléfonos móviles», sería más correcto denominarlos «computadoras de bolsillo con conexión telefónica», pues su capacidad de computación supera en mucho a la de los ordenadores de sobremesa de hace tan solo unos años. Actualmente se pueden adquirir por menos de quinientos euros teléfonos móviles de altas prestaciones que incluyan receptor GPS, sensores de iluminación, de sonido, de campo magnético, acelerómetro, giróscopo, barómetro y una o dos cámaras de fotos y de vídeo. Permiten establecer conexiones vía Bluetooth, via WIFI o vía Internet. Por todo ello, los teléfonos móviles se pueden utilizar como herramientas para desarrollar todo tipo de aplicaciones de utilidad en numerosos campos. Gajjar analizó los sensores de teléfonos móviles de los tres sistemas operativos más implantados: *Android*, *iOS* y *Windows*. En la tabla que se reproduce en la figura 2.7 se puede ver la relación que ofrece de los sensores de los dispositivos *Android* (Gajjar, 2017).

Uno de los sensores de que van dotados los teléfonos móviles es el acelerómetro, que permite medir la aceleración instantánea del aparato según la dirección de los tres ejes locales X , Y , Z (ver figura 2.8). Los acelerómetros ya se utilizan en los automóviles para activar los Airbags en caso de accidente, cuando el sistema detecta una aceleración que supera determinado límite en la dirección estudiada. Esta característica ha sido utilizada por Zaldívar et al. para enviar una llamada y un SMS (*Short Message Service*) de aviso a un número de teléfono predeterminado a través de un teléfono móvil, en caso de que el acelerómetro del vehículo sobrepase la aceleración considerada límite para una colisión frontal (Zaldívar et al., 2011).

Fig. 2.8: Esquema de ejes de referencia para las mediciones obtenidas con los sensores de un dispositivo Android (Google, 2016)

Utilizando el acelerómetro se han desarrollado trabajos en relación con la medida de los baches o del estado de los firmes en redes de carreteras. Eriksson et al. desarrollaron una aplicación para analizar el estado de las carreteras de la ciudad de Boston, en EEUU, mediante la información proporcionada por los acelerómetros instalados en una serie de taxis, llegando a la conclusión, tras una inspección visual de los eventos reportados como positivos por la aplicación, que al menos en el 90 % de los casos se requería una intervención de reparación (Eriksson et al., 2008). Mednis et al. desarrollaron algoritmos para dispositivos *Android* capaces de detectar los baches en una carretera recorrida por el vehículo que porta el teléfono móvil, a partir de los datos procedentes del acelerómetro. Los algoritmos desarrollados detectaban distintos eventos: bache aislado, sucesión de varios baches, cruce de vías de ferrocarril y otros (Mednis et al., 2011). *Street Bump* es una aplicación para teléfonos móviles de marca *iPhone* que permite a los habitantes de Boston transmitir el estado de las carreteras que recorre. Se utiliza para ello el acelerómetro del *iPhone*, el GPS y la conectividad internet (City of Boston, 2012; Bump Recorder Co., 2013). Los acelerómetros del teléfono móvil se han utilizado también para estudiar las pautas de movilidad de un peatón

circulando por las calles de una ciudad, utilizando el acelerómetro para detectar y caracterizar los cruces de calles con semáforos, cambios de nivel y otros (Bujari *et al.*, 2011, 2012). *RoadDroid* es una aplicación para teléfonos móviles Android que permite registrar el índice IRI (*International Roughness Index*) de las carreteras asignando un valor entre 1 y 5 en función de los datos del acelerómetro del propio dispositivo (Lars Forslöf, 2013). Agudelo calculó las frecuencias fundamentales de vibración de una pasarela peatonal mediante la utilización del acelerómetro de un teléfono móvil (Agudelo Zapata, 2014).

Tabla 2.3: Programas para gestión de sensores en teléfonos móviles

Aplicación	Sistema operativo	Características
Physics Toolbox	<i>Android</i>	Data logger muy completo para sensores. Muestra gráficos en tiempo real. Graba en CSV
Sensor-GPS Monitor	<i>Android</i>	Permite al dispositivo actuar como data logger de los sensores. OpenSource
Sensor Data Logger	<i>Android</i>	Similar al anterior. También es OpenSource
Sensor Dump	<i>Android</i>	Otro data logger para los sensores del <i>Android</i> . Exporta datos en formato CSV
Sensor Logger	<i>Android</i>	Data logger similar a los anteriores
Sensor Track	<i>Android</i>	Data logger similar a los anteriores
Andro Sensor	<i>Android</i>	Data logger similar a los anteriores. Exporta gráficos
Bump Recorder	<i>Android</i>	Programa japonés para registro de los baches de las calles
Street bump	iOS + Web Service	Crowdsourcing para que los usuarios puedan registrar los baches de las calles y poder visualizar la información sobre un mapa en el portal web

Otro sensor del que vienen dotados los teléfonos móviles es el sensor de orientación magnética, que permite determinar la orientación absoluta del dispositivo respecto de unos ejes fijos ligados a tierra. El sensor proporciona en

cada instante tres ángulos medidos en grados: el primero es el *azimut* o ángulo con respecto a la dirección Norte medido en el plano horizontal, el segundo es el *cabeceo* (*pitch*), ángulo de verticalidad del teléfono, y el tercer ángulo es el *alabeo* (*roll*), que mide la inclinación lateral al apoyar el teléfono sobre uno de sus lados. Combinando la información del acelerómetro con la del sensor de orientación magnética es posible referir las aceleraciones locales del dispositivo a un sistema de referencia global ligado a tierra (ver figura 2.8).

La posibilidad de disponer de recepción GPS en los dispositivos móviles ha dado lugar a numerosos trabajos relacionados con la captura de la posición o de la traza del recorrido mediante teléfonos móviles. Menard et al. realizaron una comparación entre los GPS de que vienen provistos algunos de los modelos de teléfonos móviles de gama alta más populares (Menard et al., 2011).

Otra utilización de los datos proporcionados por el GPS es medir las condiciones del tráfico en directo utilizando los datos de velocidad y posición obtenidos por teléfonos móviles situados en los vehículos. Los datos se emiten a un servidor que los procesa. Herrera et al. indican que sería suficiente que entre un 3 y un 5 % de los vehículos fueran emitiendo sus datos de posición y velocidad para monitorizar el estado del tráfico en una red. (Herrera et al., 2010). Lee y Gerla analizaron distintos procedimientos para utilizar sensores instalados en vehículos para monitorizar en directo las condiciones del tráfico en las vías (Lee and Gerla, 2010). Sanguesa et al. utilizaron la detección de las emisiones WIFI de los vehículos cercanos y la combinaron con la topología de la red por la que se circula, para determinar la densidad de vehículos presente en las vías (Sanguesa et al., 2013).

También se han estudiado procedimientos para que los usuarios, además de transmitir datos a la red que permitan analizar el estado del tráfico, reciban de vuelta información en relación con ese mismo estado del tráfico. Esta técnica permite disponer en los vehículos de navegadores inteligentes que valoran los caminos a seguir en función del tráfico real que circula por las distintas vías (Qadeer et al., 2009). Las empresas Google y Waze (recientemente adquirida por Google) ofrecen aplicaciones para teléfonos móviles con información en tiempo real del estado de tráfico de las carreteras. Para ello recaban información de los propios usuarios, a través de los GPS de sus teléfonos móviles y calculan la velocidad media de desplazamiento por las carreteras que circulan (Official Google Blog, 2013; Waze, 2006; Isytec Tecnología fácil, 2012; Internet and Television Association, 2013).

Otras aplicaciones utilizan los datos sobre incidencias de tráfico que proporcionan los organismos públicos encargados de la gestión del tráfico. Se

utiliza una señal codificada que se transmite a través de las señales *Radio Data System (RDS)*. El sistema de radiodifusión de datos conocido como RDS es un sistema desarrollado por la Unión Europea de Radiodifusión (EBU/UER), que permite añadir a una señal convencional de FM (Frecuencia modulada), una información adicional mediante la inclusión de un canal que contiene datos (*Kopitz and Marks*, 1999). En España la señal se transmite a través de la emisora *Radio 3*, que incorpora información de «*Radiobúsqueda*», el canal de mensajes de tráfico codificado, el sistema de aviso de emergencia y otras informaciones (*Radio Nacional de España*, 2016).

Otra fuente oficial de información son los servicios a través de Internet (servicios WEB), en los cuales las aplicaciones hacen una petición de información y reciben la respuesta en algún formato conocido. En España, la Dirección General de Tráfico (DGT) proporciona información de las incidencias de tráfico en las carreteras de las diferentes comunidades autónomas a través de consultas en formato *RSS (Rich Site Summary)* a sus servidores. Estas mismas incidencias suministradas a través del servicio web son las que se pueden ver en la página web de la DGT (*Dirección General de Tráfico*, 2016).

El incremento de los niveles de tráfico de ciclistas en algunas ciudades hace deseable disponer de sistemas que informen del estado de circulación en las vías destinadas a uso ciclista. Es la línea de trabajo que siguió Thepvilojanapong, monitorizando lo que denomina «*estados de circulación de una bicicleta*» a través de los sensores de un dispositivo *Android* instalado en la misma y transmitiendo dichos estados a un servidor que integra las informaciones de los distintos usuarios y permite conocer el estado de circulación de las vías ciclistas (*Thepvilojanapong et al.*, 2011).

Otra línea de trabajo combina la captura de la traza GPS del vehículo con la imagen filmada del recorrido mediante teléfonos móviles. Se trata de poder reproducir luego, de forma coordinada, la imagen del recorrido junto con la posición del móvil sobre la cartografía. Ya en el año 2009, Perakovic desarrolló una aplicación que permitía reproducir de forma coordinada el vídeo junto con la traza del vehículo. La aplicación estaba desarrollada en Java para móviles, *J2ME (Java Platform Micro Edition)*, sistema operativo que hoy en día ha dejado de utilizarse (*Perakovic et al.*, 2009).

Se han mencionado anteriormente aplicaciones para teléfonos móviles que permiten el geoetiquetado de fotografías. Algunas de estas aplicaciones permiten opciones adicionales. *Geocam* es una aplicación para dispositivos *Android* que permite efectuar medidas por triangulación (*Wazar*, 2013). *Imageotag* es una aplicación para dispositivos *Android* que ofrece la posibilidad de tomar una serie de

fotografías y poderlas reproducir ordenadamente sobre cartografía de Google (*Gary James Silva*, 2014). Geopaparazzi es una aplicación para dispositivos Android que permite tomar fotografías georreferenciadas y que añade a los metadatos la orientación de la cámara en el momento de la toma y que también permite hacer un registro de notas de voz georreferenciadas (*Andrea Antonello and contributors*, 2016).

Además de los sensores ligados a la movilidad, los teléfonos móviles disponen de otros sensores ambientales que pueden proporcionar información a los gestores de redes de transporte. Es el caso de la realización de *mapas de ruido* a lo largo de las vías de transporte. Bennet et al. integraron los valores de nivel de ruido registrados por los teléfonos móviles de los usuarios de automóviles, ciclistas o peatones para ir componiendo mapas de nivel de ruido de las zonas de tránsito (*Bennett et al.*, 2010; *Kumar et al.*, 2017).

También se han explorado las ayudas a la conducción, y en particular la detección de colisiones inminentes mediante la imagen tomada por *smartphones* situados en las partes delantera y trasera del vehículo (*Singh et al.*, 2012).

OBD (*On Board Diagnostics*) es un sistema de diagnóstico a bordo en vehículos (coches y camiones). Actualmente se emplean los estándares OBD-II (Estados Unidos), EOBD (Europa) y JOBD (Japón) que aportan una monitorización y control completo del motor y otros dispositivos del vehículo. Los vehículos pesados poseen una norma diferente, regulada por la *Society of Automotive Engineers*, SAE, conocida como *J1939. Torque y Track Recorder* son aplicaciones que utilizan los datos del conector OBD monitorizados mediante un dispositivo *Android*. Los datos son los correspondientes al rendimiento del motor y a los parámetros que afectan a la contaminación (*Hawkins*, 2010b,a).

Algunas aplicaciones proporcionan utilidades específicas para la realización de inventarios de carreteras. *Road Speed Inspector* permite identificar los radios de curvatura y comprobar la adecuación de las señales de limitación de velocidad existentes, según afirman los desarrolladores (*INVAR Ingeniería*, 2014). SGWC (Sistema de Gestión Web de Carreteras) es una aplicación que permite acceder en directo, a través de la WEB, a la información proporcionada por distintas fuentes: bases de datos, cámaras de explotación, estaciones meteorológicas remotas y otras (*Tecnocarreteras*, 2011).

Hay pocas aplicaciones que proporcionen la posibilidad de filmar vídeos sincronizados con la traza GPS o la sincronización del GPS del dispositivo con la toma de medidas procedentes del resto de los sensores. En la tabla 2.3 se detallan aplicaciones destinadas a recoger la información procedente de los sensores de los dispositivos móviles. Estas aplicaciones se suelen ofrecer en versión gratuita

con prestaciones reducidas o en versión de pago con prestaciones adicionales. El precio de las versiones de pago es de alrededor de 5 euros.

2.4 SISTEMAS DE REFERENCIA EN REDES VIARIAS

Un elemento clave en la elaboración de un inventario de carreteras es el establecimiento de un sistema de referenciación, esto es, un sistema básico de identificación de cualquier punto de la carretera, que permita establecer una correspondencia biunívoca entre las localizaciones de los elementos y los registros del inventario. Se utilizan distintos sistemas de referencia para establecer la localización de los elementos de las carreteras. Se van a comentar los sistemas de referencias absolutos, basados en coordenadas geográficas, y los sistemas de referencia lineal, basados en fijar la posición de los elementos respecto del eje de la carretera. En la práctica, se suelen utilizar ambos, quedando los elementos de las carreteras referenciados en los inventarios mediante un doble o triple sistema de referenciación.

2.4.1 Sistemas de referencia absolutos

Una de las formas de referenciar los elementos de las carreteras es establecer un sistema de referencia absoluto, basado en coordenadas geográficas o en las proyecciones planas de las mismas. Las carreteras y sus elementos asociados son entidades situadas sobre el planeta Tierra, que tiene una forma sensiblemente elipsoidal con semi-eje mayor del orden de 6378 km y semi-eje menor en torno a 6354 km. Las carreteras discurren a lo largo de distancias de decenas, cientos o incluso miles de kilómetros, por lo que se ven afectadas por la forma curva de la superficie terrestre y no es posible utilizar sistemas de referencia planos, salvo en el caso de pequeños proyectos puntuales. Hay que utilizar, por tanto, un sistema de referencia que proporcione las coordenadas geográficas de los distintos elementos, su latitud, longitud y altitud.

El problema radica en que la Tierra no tiene la forma exacta de un elipsoide. El procedimiento para fijar un sistema de referencia geográfico consiste en elegir unas dimensiones para dicho elipsoide y fijar el punto de la superficie terrestre donde dicho elipsoide es tangente a la superficie y en el que coinciden la vertical del lugar, marcada por la gravedad, y la normal al elipsoide. En las proximidades de dicho punto de tangencia, las coordenadas elipsoidales se adaptan mejor a la realidad del terreno que en los puntos alejados del mismo. A este conjunto elipsoide más punto de tangencia es a lo que se denomina el «*Datum*» del sistema de referencia.

Fig. 2.9: *Coordenadas geodésicas en el elipsoide.* λ =Longitud; ϕ =Latitud (Instituto Geográfico Nacional, 2017)

Cada país suele utilizar el sistema de referencia que mejor se adapte a su zona, así, coexisten numerosos elipsoides y sistemas de referencia. (Bernabé Poveda and López Vázquez, 2012)

Los elipsoides de referencia se definen por su semieje mayor o «radio ecuatorial», a y su «factor de achatamiento», f , que relaciona el radio ecuatorial a con el «radio polar» b mediante la siguiente expresión (Olaya, 2016):

$$f = \frac{a - b}{a}$$

Es habitual utilizar el inverso del achatamiento, α , que es un número próximo a 300 y se calcula por la expresión:

$$\alpha = \frac{1}{f} = \frac{a}{a - b}$$

En la actualidad, el *World Geodetic System (WGS-84)* es el sistema de referencia más utilizado y es el que utilizan los dispositivos GNSS, proporcionando compatibilidad de la información geográfica entre distintas zonas del planeta (National Imagery Mapping Agency, 2000).

En España se adoptó en 1970 el Sistema ED50 (*European Datum, 1950*) como sistema oficial, tomando como parámetros los del elipsoide de Hayford de 1909 ($a = 6378388 \text{ m}$ y $\alpha = 297$) y punto astronómico fundamental está en la torre de *Helmert*, en la ciudad alemana de Potsdam. Este sistema sustituyó al antiguo sistema que utilizaba el elipsoide de Struve y datum Madrid del Observatorio del

Retiro. La Subcomisión de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) para el marco de referencia europeo (EUREF), recomendó que el Sistema de Referencia Terrestre para Europa que debía ser adoptado, es el denominado *European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)*. El Real Decreto 1071/2007 estableció el ETRS89 como sistema de referencia geodésico oficial en España para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares. En el caso de las Islas Canarias, se adopta el sistema REGCAN95, ya que ETRS89 sólo afecta a la parte estable de la placa eurasiática. Ambos sistemas tienen asociado el elipsoide GRS80 ($a = 6378137\text{ m}$ y $\alpha = 298.257$) y están materializados por el marco que define la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales, REGENTE, y sus densificaciones (*Instituto Geográfico Nacional*, 2017).

A pesar de que toda la cartografía que se desarrolla actualmente en España utiliza los últimos sistemas de referencia mencionados, (ETRS89, REGCAN95, WGS84), no es infrecuente encontrarse aun con cartografías y datos referidos al antiguo sistema de referencia ED50, por lo que hay que prestar atención a dicho detalle cuando se utilizan fuentes de datos. En concreto los proyectos de carreteras anteriores a 2007 utilizaban las coordenadas referidas al sistema de referencia ED50. Hay que tener en cuenta, que la diferencia al proyectar un punto con coordenadas referidas al sistema de referencia ED50 sobre una cartografía referida al sistema ETRS89 o al WGS84 pueden llegar a 200 metros.

Transferir las coordenadas geodésicas, longitud y latitud, a un mapa, es convertirlas en coordenadas planas de dos dimensiones y para ello se necesitan las proyecciones cartográficas. Las *proyecciones cartográficas* son una correspondencia biunívoca matemática entre los puntos de la superficie de una esfera o elipsoide de revolución, y los de un mapa. Se expresan en función de la latitud ϕ y la longitud λ que se traducen en el plano en las *coordenadas planas* o *cartesianas* x e y . Todas las conversiones desde una superficie esférica o elipsoidal a un mapa de dos dimensiones conllevan algún tipo de distorsión. Las distorsiones están relacionadas con ángulos, superficies, distancias y direcciones. Si la proyección mantiene las relaciones angulares, es una proyección *conforme*; si mantiene la representación de la superficie es una proyección *equivalente*, y si conserva la representación de la distancia, es una proyección *equidistante* (*Bernabé Poveda and López Vázquez*, 2012).

La proyección *UTM (Universal Transversal Mercator)* ha generado un sistema de referencia propio que es el más usado en los Sistemas de Información Geográfica. Es de aplicación a toda la Tierra, excepto a las zonas polares. Utiliza el elipsoide WGS-84 y divide la Tierra en zonas rectangulares con una amplitud de

6° de longitud, totalizando 60 husos, numerados de 1 a 60. En latitud, cada huso se divide en 20 zonas con una amplitud de 8°, desde los 80° Sur hasta los 84° Norte, condificadas desde la C hasta la X (solo esta última zona tiene una amplitud de 12°). Por lo tanto, cada zona UTM se identifica por un número y una letra.

El espacio geográfico que ocupa España está comprendido en cinco husos y tres zonas, por lo que tiene cinco orígenes de coordenadas diferentes. La zona peninsular y Baleares están comprendidas en los husos 29, 30 y 31, mientras que las Islas Canarias están situadas en los husos 27 y 28. Las zonas son la R, para las Islas Canarias, y las S y T para la España peninsular y las Islas Baleares (Fernández-Coppel, 2001).

El cambio de coordenadas entre los diferentes sistemas de referencia y proyecciones requiere del correspondiente cálculo matemático. Dicho cálculo se basa en diferentes parámetros. Para facilitar la localización de los parámetros adecuados a una conversión concreta, así como para facilitar la utilización de los miles de sistemas de coordenadas existentes, diversos organismos internacionales han codificado los sistemas de referencia y facilitan el acceso a los valores de los parámetros de conversión. La base de datos más utilizada dentro de los Sistemas de Información Geográfica es la *EPSG*, inicialmente creada por el *European Petroleum Survey Group* y actualmente mantenida por la *International Association of Oil and Gas Producers*. La base de datos de sistemas de referencia del EPSG consta actualmente de más de cuatro mil sistemas de referencia codificados. Otra base de datos muy utilizada es la de la *International Astronomical Union*, *IAU*, que consta de unas dos mil cuatrocientas referencias (Butler et al., 2013; *International Association of Oil and Gas Producers*, 2017).

Para realizar el cambio de coordenadas de unos sistemas de referencia a otros se pueden utilizar diversas herramientas informáticas. En el año 1990, Evenden desarrolló la librería de procedimientos «*PROJ*» para entornos UNIX, por encargo del Departamento de Interior de los Estados Unidos, que ha servido de base a numerosos programas de conversiones cartográficas (Evenden, 1990). Actualmente la librería más utilizada dentro de los programas SIG es la *Geospatial Data Abstraction Library*, *GDAL*, desarrollada inicialmente por Frank Warmerdam y que actualmente forma parte de los programas mantenidos y desarrollados por la Open Source Geospatial Foundation, *OSGeo* (*Open Source Geospatial Foundation*, 2016).

Otra proyección cartográfica de uso frecuente es la proyección Mercator. En los últimos años la proyección Mercator se ha popularizado por ser la proyección que utilizan los mapas WEB, como el de Google o el de OpenStreetMap. En este caso utilizan una proyección que se denomina *Web Mercator*, *Google Web Mercator*,

Tabla 2.4: *Códigos EPSG de los principales Sistemas de Referencia utilizados en España*

Descripción	Código EPSG
Datum Madrid 1870	2062
Coordenadas geográficas ED50	4230
Proyección UTM ED50 Huso 28 N	23028
Proyección UTM ED50 Huso 29 N	23029
Proyección UTM ED50 Huso 30 N	23030
Proyección UTM ED50 Huso 31 N	23031
Coordenadas geográficas ETRS89	4258
Proyección UTM ETRS89 Huso 28 N	25828
Proyección UTM ETRS89 Huso 29 N	25829
Proyección UTM ETRS89 Huso 30 N	25830
Proyección UTM ETRS89 Huso 31 N	25831
Coordenadas geográficas WGS 84	4326
Proyección UTM WGS-84 Huso 28 N	32628
Proyección UTM WGS-84 Huso 29 N	32629
Proyección UTM WGS-84 Huso 30 N	32630
Proyección UTM WGS-84 Huso 31 N	32631
Coordenadas geográficas WGS84 Web Mercator	3857
Proyección Google Mercator	900913

Spherical Mercator, WGS 84 Web Mercator o WGS 84/Pseudo-Mercator. La proyección que utilizan no es estrictamente elipsoidal ni estrictamente esférica. Utilizan coordenadas geográficas elipsoidales referidas al elipsoide WGS-84, pero las proyectan como si se tratara de una esfera de radio 6 378 137 m. Hay algo de confusión con los códigos asociados a esta proyección en las bases de datos. Su codificación actual en la base de datos de la EPSG es EPSG:3857, con el nombre oficial de «*WGS 84 / Pseudo-Mercator*». También se la conoce con el código *EPSG:900913*.

Las codificaciones EPSG de los sistemas de referencia que se encuentran más frecuentemente en España, cuando se trabaja con cartografía, se han resumido en la tabla 2.4.

El sistema de referencia absoluto mediante coordenadas geográficas es de gran utilidad para fijar la posición absoluta de los elementos, pero no indica nada acerca de su localización respecto de la carretera a la que pertenecen dichos elementos. Por otra parte, la precisión de las coordenadas proporcionada por los dispositivos GNSS puede dar lugar a errores de interpretación en relación con la posición de determinados elementos. Por poner un ejemplo, las coordenadas de un determinado elemento de señalización vertical pueden hacer dudar acerca de a qué sentido del recorrido de la carretera corresponde la señal en cuestión.

2.4.2 Sistemas de referencia lineal

La manera más habitual de establecer la localización de los elementos en carreteras, ferrocarriles y otras infraestructuras lineales es la denominada referencia lineal. Consiste en definir la localización de los elementos mediante la distancia, a la que están situados, medida a lo largo de un eje que hace de referencia, desde un determinado punto del eje que se toma como origen (*Rebolj et al.*, 2008).

La descripción de la referencia lineal está recogida en la norma ISO 19148 de la *International Organization for Standardization (Technical Committee ISO/TC 211*, 2012). Esta norma establece cómo utilizar la referencia lineal para determinar la localización de los elementos de las carreteras u otras infraestructuras lineales. Consiste en utilizar un elemento lineal como base del sistema de referencia y detallar la posición del resto de los elementos en relación con dicha línea. En la norma ISO 19148 también se describe la «*Segmentación Dinámica*», que permite definir propiedades que se extienden a lo largo del recorrido de la carretera y cuyo valor cambia en diferentes tramos de la misma.

La Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR (*Asociación Española de Normalización y Certificación*, 2017), ha traducido la norma ISO 19148 con el título «*Información geográfica: Referencia Lineal*», norma UNE-EN ISO 19148 (*Comité Técnico AEN/CTN*, 2012). La norma ISO 19148 tiene unas denominaciones un poco confusas para los elementos que definen la *Referencia Lineal*. La traducción demasiado literal del inglés que hace la norma española, mantiene dicha denominación confusa para los elementos. Por ello, en esta tesis, se utilizarán en algunos casos denominaciones alternativas a las de la norma para determinados conceptos. Un ejemplo es la denominación de la «*Segmentación Dinámica*», muy extendida en la práctica y que en la norma ISO 19148 recibe la denominación «*evento de atributo*».

La norma ISO 19148 define la «*Referencia Lineal*» como la especificación de

una localización relativa a un *elemento lineal*, mediante una medición a lo largo de (y opcionalmente un desplazamiento desde) ese elemento lineal. El *Elemento lineal* se define como el elemento unidimensional que sirve de eje a lo largo del cual se realiza la referencia lineal. En esta tesis se utilizará a veces la expresión «*línea de referencia*» o «*eje de la carretera*» para referirse a este eje.

La posición de un elemento se puede establecer de manera absoluta, mediante la medida de la distancia recorrida a lo largo del «*elemento lineal*» desde el origen absoluto de la misma. En el caso de las carreteras dicho origen suele establecerse en la intersección de dicha vía con otra de la que «*nace*». También se puede indicar la posición de los elementos de manera relativa, indicando la distancia recorrida a lo largo de la carretera desde un punto de referencia determinado. A estos puntos de referencia relativa la norma ISO 19148 los denomina «*referente origen*». En carreteras estos puntos de referencia suelen ser los hitos kilométricos, o los *milestones* en los países anglo-sajones. En todos los casos las medidas se dan en el sentido creciente del kilometraje de la vía.

En la figura 2.10 se puede ver el esquema de la referencia lineal absoluta de un determinado elemento A. Por su parte, en la figura 2.11, se muestra la referencia relativa del mismo elemento A. En ambas figuras, la línea de referencia se denomina «*elemento lineal*» y se puede observar que las distancias se miden en el sentido de avance de dicho *elemento lineal*.

Fig. 2.10: Localización de un elemento mediante referencia lineal absoluta (Comité Técnico AEN/CTN, 2012)

En las carreteras existen elementos cuya geometría se puede asimilar a la de un punto, y que requieren una única distancia para definir su localización, como una señal de tráfico o la localización de un accidente, pero también existen elementos que se extienden a lo largo de una determinada longitud de la carretera, como podría ser el caso de una marca vial, una barrera de contención u otros. En el caso de estos elementos, cuya geometría se asemeja más a la de una línea, la localización mediante referencia lineal se hace midiendo el punto de la carretera donde comienzan y el punto donde terminan. En la figura 2.12 se muestra la referencia lineal de uno de dichos elementos lineales. En la figura, extraída de la norma española, se ha mantenido la denominación inglesa del «*origen*» (*From, desde*) y «*final*» (*To, A*) del elemento. En la misma figura se observa un elemento

Fig. 2.11: Localización de un elemento mediante referencia lineal relativa (Comité Técnico AEN/CTN, 2012)

puntual definido mediante la localización «en» (en inglés, *AT*), que equivaldría a la localización de los elementos puntuales de los que se ha hablado en párrafos anteriores.

Fig. 2.12: Localización de un elemento lineal mediante la localización de su origen y su final (Comité Técnico AEN/CTN, 2012)

Los elementos (*eventos*) pueden estar situados sobre el eje de la carretera o a cierta distancia del mismo. Cuando están situados en el borde de la carretera suele ser suficiente indicar a qué lado de la carretera están situados. En otros casos puede ser conveniente indicar la distancia a la que se encuentra el elemento del eje de la carretera o de su borde exterior. La norma ISO 19148 establece que hay que indicar la distancia a la que se encuentra el evento de la proyección del mismo sobre la línea de referencia. En la figura 2.13 se puede ver el esquema para establecer la referencia lineal de un elemento situado a cierta distancia de la línea de referencia.

La segmentación dinámica permite utilizar un solo elemento que define la geometría del eje de la carretera para asignar los valores de diferentes propiedades que se extienden a lo largo de dicho recorrido. El término «segmentación dinámica» deriva de que no es necesario que las entidades de línea se dividan (*se «segmenten»*) cada vez que se modifica el valor de un atributo; se puede ubicar el segmento «dinámicamente». La segmentación dinámica permite asociar varios conjuntos de atributos a cualquier parte de una entidad

Fig. 2.13: Localización mediante referencia lineal de un elemento situado a cierta distancia de la línea de referencia (Comité Técnico AEN/CTN, 2012)

lineal existente, independientemente de dónde tenga su inicio o su fin. Estos atributos pueden mostrarse, consultarse, editarse y analizarse sin que la geometría de la entidad lineal subyacente se vea afectada. En la figura 2.14 se puede ver el esquema de segmentación dinámica para varias propiedades del estado de una carretera. Se utiliza una sola geometría, y los segmentos en los que las propiedades tienen diferentes valores se definen mediante referencia lineal (*Environmental Systems Research Institute, 2016*).

Fig. 2.14: Utilización de «segmentación dinámica» para definir los valores de varias propiedades relativas al estado de una carretera (*Environmental Systems Research Institute, 2016*)

En el caso de las carreteras de una sola calzada y doble sentido, para caracterizar geométricamente un tramo, se utiliza el *eje de la vía*, que es la línea que recorre la divisoria entre carriles pegada al pavimento. En el caso de las vías de calzadas separadas o con más de un carril por sentido, el eje del trazado puede ser el centro de la mediana, si esta fuera de anchura constante o con variación de anchura aproximadamente simétrica, o bien el borde interior de cada calzada (*Ministerio de Fomento, 2016*).

Una vez definido el *eje de la vía*, se puede utilizar este como base del sistema de referencia lineal respecto del cual situar el resto de elementos que se pretende inventariar. Para definir las características físicas y geométricas de la propia vía es habitual definir una serie de puntos a lo largo del eje a los que se denomina «secciones» o «estaciones». Se pueden definir estas secciones a distancias fijas, por ejemplo cada diez o cada veinte metros. Cada una de estas *secciones* llevará asociados unos datos relativos a la geometría de la vía en ese punto: pendiente, radio de curvatura, distancia de visibilidad y peralte, entre otros. Además cada sección llevará asociadas unas características físicas que describirán en ese punto concreto de la carretera, el ancho de los carriles, de la calzada, el tipo de pavimento, su estado de conservación, etc.

Cada elemento de equipamiento se puede asociar a una localización a través de su posición respecto del eje. Una forma de referenciar los distintos elementos es fijar unos hitos fijos en el eje, denominados *puntos kilométricos*, y referenciar el resto de elementos por su distancia respecto al último hito sobrepasado recorriendo la carretera en el sentido creciente de la numeración de los puntos kilométricos. Así se puede hablar del punto de la carretera en el *PK 32+500* para referirse al punto de la carretera que está 500 m después del punto kilométrico 32.

Se da la circunstancia de que los puntos kilométricos se suelen mantener fijos a lo largo del tiempo, incluso aunque cambie el trazado de la vía en algunos tramos, pudiendo suceder que la distancia a lo largo del eje entre dos puntos kilométricos sucesivos pueda resultar mayor o menor que mil metros (*Kraemer et al.*, 2009). El hito kilométrico, aparte de un indicador aproximado de longitud, es fundamentalmente una referencia inmutable sobre la red y queda constancia en las imágenes grabadas. En la figura 2.15 se pueden ver varios modelos de hitos kilométricos utilizados en las carreteras españolas a lo largo de la historia. La figura 2.15a corresponde al «*Miliario de Nerón*», en la Vía de la Plata en el *Municipium Capara* (Cáparra), al norte de la provincia de Cáceres. Es uno de los primeros hitos que se utilizaron en España. Las calzadas romanas estaban marcadas con «*piedras miliarias*» cada 1000 pasos, en realidad dobles pasos, de 1,48 m cada uno, por lo que la milla romana equivale a 1480 m. La figura 2.15b corresponde a los antiguos hitos de granitos que se utilizaban en las carreteras españolas. En la parte inferior, las figuras 2.15c y 2.15d corresponden a los hitos que se utilizan actualmente en España. La figura 2.15c en forma de placa, señales de código S-570 a S-573. La figura 2.15d corresponde a hitos en forma de poste, señales de código S574 y S-575. Los códigos de las señales actuales se describen en la «*Norma 8.1 IC: Señalización Vertical*», del Ministerio de Fomento (*Ministerio de Fomento*, 2014).

Fig. 2.15: Tipos de hitos kilométricos utilizados en las carreteras españolas a lo largo de la historia. a) Millario de Nerón. b) Antiguos hitos de granito. c) y d) Hitos utilizados en la actualidad y que se describen en la «Norma 8.1 IC: Señalización Vertical» (Ministerio de Fomento, 2014)

También se puede utilizar un sistema de referencia lineal absoluta basado en la distancia de cada punto respecto al origen del tramo, en lugar de utilizar el hito más cercano. Los problemas en caso de modificaciones del trazado son similares al caso de referencia relativa respecto de los puntos kilométricos. En España, las carreteras se dividen en tramos y subtramos que son unidades espaciales homogéneas para el tratamiento de la información y que están perfectamente definidos por sus dos nudos extremos (origen y final de tramo), de fácil identificación y de difícil alteración en el tiempo. Los nudos se hacen coincidir con las intersecciones entre distintos itinerarios. A partir del punto origen se miden las distancias a cualquier punto del tramo. El inventario de carreteras estatales españolas de 2008 utilizó un triple sistema en la identificación de cada punto. Los sistemas de referencia empleados fueron los siguientes (Ministerio de Fomento, 2009a):

- **Distancia a origen de tramo:** Una vez definida la tramificación, los tramos se convierten en las unidades básicas de tratamiento del inventario, quedando

los nudos extremos como puntos fácilmente identificables y reconocibles a partir de los cuales se puede referenciar cualquier punto del tramo. Todo punto queda definido y localizado mediante la distancia al nudo origen del tramo (en metros).

- **Distancia al último hito kilométrico:** todo punto queda localizado por su distancia en metros al último hito encontrado, cuando se recorre la carretera en sentido ascendente del kilometraje, mientras que cuando se recorre en sentido contrario se referencia respecto al hito kilométrico de menor numeración más próximo (situado en el recorrido después del punto). Un ejemplo podría ser *PK 5+090*
- **Coordenadas geográficas U.T.M.:** Se trata de disponer de las coordenadas U.T.M. (Universal Transversal Mercator), y cota Z del eje de la carretera

Hay que destacar aquí, que la descripción del sistema de referencia que da el inventario español de 2008, «*coordenadas UTM*», es incompleta, y por tanto incorrecta. La proyección UTM se puede hacer desde las coordenadas geográficas referidas al sistema ED50, desde las coordenadas geográficas referidas al sistema ETRS89 o desde cualquier otro. Puede dar lugar a errores groseros de interpretación de la situación de las líneas de los ejes de las carreteras y de sus elementos asociados, según se considere que las coordenadas UTM provienen de un sistema o de otro. Para descubrir el sistema de referencia utilizado en el inventario, hay que acudir a la página 18 del libro «*Manual de variables*» (Ministerio de Fomento, 2009c) del inventario, donde aclara que las coordenadas X e Y UTM son las proyecciones respecto del elipsoide de Hayford y el Datum Europeo de Postdam, o sea, el sistema ED50. El inventario se hizo en 2008 y se publicó en 2009; el Real Decreto que sustituía el sistema de referencia ED50 por el actual ETRS89 es del año 2007, como se ha indicado en el apartado 2.4.1.

Los sistemas de referencia «*distancia al origen del tramo*», «*distancia al hito anterior*» y «*coordenadas absolutas*», se utilizan en todos los países, si bien, en los países anglosajones (Reino Unido, Estados Unidos y otros), en los que las medidas de distancias en las carreteras se hacen en millas, utilizan los llamados *milestones* en lugar de los hitos kilométricos. En cuanto a las coordenadas geográficas utilizadas, cada país utiliza el sistema de referencia que mejor se adapte a las cartografías que utilicen, que en el caso de España son los mencionados ED50, ETRS89 y REGCAN95.

La gestión informática de los sistemas de referencia lineal mencionados, requieren de aplicaciones informáticas específicamente adaptadas a ello. Los programas SIG utilizados habitualmente suelen disponer de extensiones específicas para el tratamiento de la referencia lineal y la segmentación dinámica.

2.5 MODELOS Y FORMATOS DE DATOS EN INVENTARIOS DE CARRETERAS

2.5.1 Modelos y formatos

Un inventario de una carretera es una representación simplificada de su realidad, centrada en algunos aspectos concretos que interesan a los agentes que vayan a utilizar dicho inventario. En esta sección se tratará acerca de dos conceptos, íntimamente relacionados y con una denominación similar, pero que encierran diferentes significados: los modelos de datos utilizados para los inventarios y los formatos de almacenamiento de esos datos.

Un modelo es una representación simplificada de la realidad. Los modelos constituyen abstracciones de la realidad que en general se construyen para facilitar la comprensión de determinados fenómenos (*Argerich et al.*, 2012). Pueden definirse diferentes modelos de la misma realidad con solo tener en cuenta distintos aspectos de ella (*Rodríguez Pascual and Bernabé Poveda*, 2012).

Hay diferentes tipos de carreteras y los elementos a inventariar en cada caso son diferentes. En los últimos años algunos tipos de vías, diferentes de las tradicionales, han ido ganando una importancia creciente. Este es el caso de las vías ciclistas o de los caminos pedestres, pero también el de los caminos forestales o las pistas de montaña utilizadas por los servicios de extinción de incendios, o el de las rutas turísticas en parajes naturales. El inventario de dichos tipos de vías ayuda en la simplificación del proceso de toma de decisiones destinadas a su correcta gestión y en la obtención de un rendimiento óptimo de las inversiones realizadas.

Dentro de un mismo tipo de carreteras, hay diferentes tipos de inventarios: de características geométricas, de accidentes, de estructuras, del estado de los pavimentos y otros. En cada caso, los elementos a inventariar así como las variables de interés de dichos elementos son diferentes.

Además, hay diferentes agentes interesados en los inventarios de carreteras y las necesidades de información de cada uno de ellos son diferentes. No tienen las mismas necesidades de información los organismos encargados del diseño y planificación de una red de carreteras, que las empresas encargadas de su construcción y mantenimiento. Pero tampoco estos agentes tienen las mismas necesidades de información que los servicios de emergencias o las empresas destinadas al transporte de pasajeros o mercancías.

El modelo de una carretera es algo exclusivamente conceptual. Las reflexiones de Olaya acerca de los modelos geográficos son directamente aplicables a

cualquier modelo y, en particular, a los modelos de datos para carreteras. El primer paso hacia la creación de un inventario de carreteras implica el establecimiento de un modelo conceptual relativo a cómo se ha de interpretar la realidad. Se trata de conceptualizar el espacio estudiado, las variables tratadas y la variación de estas a lo largo de la carretera. Se hace necesario extraer una serie de elementos y valores característicos, los cuales en última instancia se recogerán como valores numéricos, que son los que «entiende» el ordenador (Olaya, 2016).

Por su parte, los formatos de almacenamiento de datos plantean básicamente la solución al problema de cómo convertir de la forma más eficiente dichos elementos y valores numéricos característicos en formatos digitales. Es decir, cómo escribir dichos valores en un soporte digital o guardarlos en la memoria del ordenador de la mejor manera posible. El gran volumen de información asociado con los inventarios de carreteras hace necesaria la utilización de formatos de datos específicos. Uno de los problemas más importantes entre los usuarios de inventarios de carreteras es el intercambio de información entre distintos sistemas o aplicaciones. Los formatos de almacenamiento de datos deben atender principalmente a tres necesidades básicas, que son las que definirán su idoneidad para cada tarea y tipo de dato:

- adecuar el espacio ocupado por los datos a las disponibilidades.
- optimizar la eficiencia de cálculo.
- facilitar el intercambio de información entre diferentes sistemas

Un aspecto importante de los inventarios de carreteras es la naturaleza dinámica de la información contenida en los mismos. Un inventario que no esté debidamente actualizado pierde utilidad. Hay casos especiales en los que la frecuencia de cambios en el estado de las carreteras es muy alta, por ejemplo en las redes de carreteras y caminos tras catástrofes naturales u otro tipo de desastres antropogénicos, como accidentes industriales o situaciones de guerra. En dichas situaciones, el estado de las vías varía de un día para otro, a medida que avanzan los trabajos de recuperación. Las herramientas habituales para selección de rutas se vuelven ineficientes, debido a condiciones desconocidas, impredecibles e inestables para el tráfico. Los desprendimientos, socavones, colapso de puentes u otras circunstancias provocan zonas de congestión o de interrupción del tráfico imprevisibles (Chen *et al.*, 2011). La urgencia necesaria en las actuaciones hace imprescindible minimizar los tiempos dedicados a la planificación, implementación y actualización de los inventarios. En estas situaciones también es frecuente no disponer sobre el terreno de equipos y personal especializado en la realización de inventarios de carreteras. Hay una necesidad imperiosa de una constante actualización de la información y de compartir los datos con diferentes agentes

intervinientes en las tareas de asistencia y reconstrucción. De esta forma, la improvisación de medios, equipos, personal y procedimientos no es una excepción, sino que es la norma (*Ley et al.*, 2014).

Por todos estos motivos, es difícil definir y establecer a priori un modelo de datos que incluya todos los elementos y variables que es necesario inventariar y que sirva para todos los tipos de inventarios. Además, es imprescindible que la información de los inventarios esté disponible en formatos de almacenamiento de datos abiertos y definidos que permitan a los diferentes agentes interesados el desarrollo de herramientas específicas destinadas a la explotación de la información contenida en los mismos dentro de sus respectivas áreas de interés (*Proulx et al.*, 2014; *Schneider et al.*, 2005).

Existen algunos modelos de datos para la realización de inventarios de carreteras, fundamentalmente destinados a los agentes encargados del diseño, construcción y mantenimiento de las carreteras convencionales para automóviles. Sin embargo, dichos modelos de datos no ofrecen una solución adecuada para la utilización de dichos inventarios por parte de otros agentes interesados en las mismas o para el inventariado de otros tipos de vías.

2.5.2 Diseño y toma de datos en inventarios

La realización de un inventario de carreteras lleva aparejada la realización de varios procesos: (1) diseño y planificación del inventario, (2) recogida de datos en campo, (3) procesamiento de los datos y almacenamiento, (4) publicación de los resultados y (5) mantenimiento y actualización del inventario.

El diseño y la planificación del inventario consiste básicamente en dos tareas: definir los elementos y las variables que se pretende inventariar y seleccionar los procedimientos y equipos que se van a utilizar en las siguientes fases del inventario. La definición de los elementos y variables que se quiere inventariar equivale a establecer el modelo de datos que se va a utilizar para modelizar la realidad de la carretera. Algunos organismos responsables de la construcción, mantenimiento y explotación de las redes de carreteras definen la lista de los elementos que se deben de incluir en el inventario de una carretera, y la lista de variables que se deben inventariar para cada elemento (*Draheim*, 2016; *Ministerio de Fomento*, 2009a,c). En general, estas listas están orientadas a las redes de carreteras convencionales para vehículos y se adaptan mal a otros tipos de vías. Además, los elementos de estas listas, así como las variables que se seleccionan para cada uno de los elementos, son de utilidad principalmente para los agentes encargados del proyecto, la construcción y el mantenimiento de las carreteras, no

teniéndose en cuenta las necesidades de otros agentes interesados en los inventarios de las carreteras, como pueden ser los servicios de emergencias, los proveedores de servicios, los usuarios finales u otros.

Hay diferentes procedimientos para hacer la toma de datos necesarios para la realización del inventario. Jalayer et al. (2014) menciona los siguientes: (1) Toma de datos en campo, (2) utilización de fotografías y vídeos, (3) dispositivos GNSS y Sistemas de Información Geográfica (GIS), (4) fotografías aéreas, (5) fotografías procedentes de satélites y (6) LIDAR y *Laser Scanning*. El coste de cada uno de los procedimientos varía en función de los equipos que necesita emplear para la toma de datos y el procesamiento posterior de los mismos (Jalayer et al., 2014). Es habitual la utilización de una combinación de dos o más de estos procedimientos para obtener el resultado final. Si bien todos estos procedimientos se adaptan mejor o peor al inventariado de carreteras convencionales para automóviles, algunos de ellos no son de aplicación en otros tipos de vías. Por ejemplo, en el caso de las vías ciclistas o de los caminos forestales, puede no ser posible recorrer las vías con los vehículos del tipo *MMMS* que se utilizan habitualmente en las carreteras convencionales pavimentadas para automóviles. Otro ejemplo podría ser la imposibilidad de utilizar fotografías aéreas o de satélite en túneles, o en rutas forestales que transcurren bajo arbolados espesos, como sucede en zonas tropicales.

Es habitual que tanto la toma de datos como el procesamiento y publicación posterior de los mismos no lo realice directamente la administración encargada de la explotación de las vías, sino que se lleve a cabo por empresas subcontratadas al efecto. En estos casos, la utilización de diferentes sistemas de referencia o de formatos de datos incompatibles con los utilizados por la administración puede generar problemas (Jalayer et al., 2014).

El procesamiento en gabinete de los datos brutos recogidos sobre el terreno consume gran parte del tiempo dedicado a la realización del inventario y constituye uno de los componentes importantes del coste global del mismo. En el caso de las carreteras convencionales para automóviles, Ozbek et al. (2010) señalan tres tipos de elementos que se incorporan en los inventarios: (1) elementos de coste elevado pero con un número pequeño de unidades, por ejemplo las estructuras, (2) elementos de coste elevado y con un número grande de unidades, por ejemplo los firmes, y (3) elementos con un coste unitario pequeño pero de los que existe un número muy elevado de unidades, por ejemplo la señalización, los elementos de contención, los de iluminación y otros (Ozbek et al., 2010).

En el caso de los elementos de bajo coste unitario pero gran número de unidades, es habitual realizar la filmación de la carretera con un vehículo provisto

de cámaras de vídeo y posteriormente proceder al inventariado de los distintos elementos visionando los vídeos en gabinete. Recientemente se están desarrollando herramientas informáticas que permiten la identificación automática de estos elementos a partir de los vídeos o fotografías (*Khan et al.*, 2011; *Balali and Golparvar-Fard*, 2015; *Balali et al.*, 2015a,b). En el caso de carreteras convencionales para automóviles y en los entornos de los países desarrollados, este tipo de soluciones pueden ser de interés y suponer una reducción en el coste de realización de los inventarios. No es el caso del inventariado de otros tipos de vías o de otros usos de las mismas diferentes del tráfico para automóviles, donde las variables que interesa inventariar pueden ser otras no incluidas en esos software de reconocimiento de imágenes.

2.5.3 Modelos de datos existentes

Toda la información recogida por los distintos procedimientos tiene que ser almacenada en bases de datos gestionadas informáticamente. Hay diversas aplicaciones comerciales para la realización de inventarios de carreteras. La mayoría de estas aplicaciones utilizan modelos de datos propios y operan de manera aislada, con una capacidad muy limitada, o en algunos casos con ninguna capacidad, de compartir la información con otros programas. Ese tipo de herramientas informáticas no se pueden utilizar para otro propósito que aquel para el que fueron inicialmente diseñadas y, frecuentemente, cualquier cambio en los criterios solicitados del inventario o en las normativas, dejan obsoletas las aplicaciones. Este es un problema para las administraciones que, si eligen este tipo de soluciones informáticas, quedan «prisioneras» del fabricante a partir de ese momento, debido a la imposibilidad de recuperar los datos para utilizarlos con otros programas o para otros usos diferentes del previsto.

Otro problema común y que complica la utilización de los programas comerciales se da cuando el idioma utilizado en el diseño e implementación de las bases de datos no es el mismo que el utilizado por las personas encargadas de la confección y actualización de los inventarios. Además, en la mayoría de casos, los programas comerciales están muy orientados a la legislación de un país concreto, lo que supone una dificultad añadida para su utilización en otros países con diferentes normativas, denominaciones y clasificaciones de las vías y sus elementos. Por último indicar que los programas comerciales suelen estar basados en complejos esquemas de bases de datos relacionales compuestas por cientos de tablas, cada una de ellas con decenas de campos diferentes. Los técnicos encargados de su uso necesitan un largo periodo de aprendizaje antes de poder sacar partido a los programas (*Halfawy*, 2010; *Jalayer et al.*, 2014; *Rasdorf et al.*,

2009).

La interoperabilidad entre distintas aplicaciones ha dejado patente la necesidad de utilizar modelos estándares y formatos de datos abiertos (*Halfawy*, 2010). Las autoridades y los organismos oficiales encargados de las carreteras en Estados Unidos y en la Unión Europea están promoviendo iniciativas en ese sentido. Esto ha dado lugar a diferentes estándares (*LandXML.org*, 2016; *OpenGeospatial Consortium*, 2016; *U.S. Department of Transportation*, 2010; *European Commission*, 2007b; *Svard*, 2006; *European Commission*, 2007a; *IGN. Grupo de trabajo de Redes e Infraestructuras del Transporte*, 2015). El principal problema de estos estándares es que tratan de definir un modelo de datos a priori que abarque una lista completa de los elementos y las variables que permitan definir cualquier tipo de carreteras y sirvan a cualquier tipo de usuarios, y esto da lugar a una excesiva complejidad. El desarrollo de aplicaciones informáticas que implementen fielmente dichos modelos estándares es una tarea muy compleja y, en la práctica, solo las grandes empresas y los organismos gubernamentales pueden realizar las inversiones necesarias para el desarrollo de programas que los implementen. Además, debido a la complejidad de los modelos de datos utilizados, se necesita un largo periodo de aprendizaje y entrenamiento para poder utilizarlos con eficacia. Algunos desarrollos se han basado en un subconjunto de los elementos y variables del estándar original (*LandXML.org Industry Consortium*, 2008; *Finnish National Authority*, 2016).

Al igual que sucede con las aplicaciones informáticas comerciales, otro problema asociado con estos estándares es que están muy orientados a las reglamentaciones, normativas e idioma de algún país o zona geográfica concreta, y se adaptan mal a otras regiones o a legislaciones diferentes. Por ejemplo, la modelización de las señales de tráfico en *LandXML* está adaptada al manual de los Estados Unidos *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways* (*Federal Highway Administration*, 2009), y eso dificulta la codificación de las señales en Europa. Al igual que sucede con los programas comerciales, estos estándares están pensados para su utilización por un único tipo de agentes de entre los muchos interesados en la información de los inventarios de carreteras (*Ganeshan et al.*, 2001).

Algunas aplicaciones SIG disponen de extensiones que permiten la gestión de los inventarios de carreteras (*Environmental System Research Institute*, 2016; *Anguix*, 2016).

Como ya se ha mencionado, algunos tipos de vías diferentes de las carreteras tradicionales destinadas a la circulación de automóviles han adquirido una notable importancia en los últimos años. El entorno urbano también da lugar a la necesidad de inventariar vías específicas, como las rutas turísticas en las ciudades, o los

caminos peatonales para el acceso de los niños a los colegios (*Washington State Department of Transportation*, 2015; *Rails-to-Trails Conservancy*, 1986). Los cuerpos de bomberos y los equipos de emergencias en general necesitan el inventariado de rutas tanto en entornos urbanos como forestales. Los elementos y las variables que se necesita inventariar en estos casos son específicas de estos usos (*Teixido and Sala*, 2016).

Un ejemplo de un proyecto de grandes dimensiones en el que están involucradas carreteras no convencionales es la red de caminos de larga distancia de Europa. Se trata de una red de caminos pedestres de larga distancia que recorren Europa. A pesar de que la mayoría de los caminos pedestres están localizados en un solo país o una región, cada una de las rutas numeradas de esta red de caminos de larga distancia atraviesa varios países diferentes (*ERA Foundation*, 2004). Actualmente la red consta de doce *E-paths* que abarcan más de 55.000 kilómetros, atravesando toda Europa. Por poner un ejemplo, la ruta de larga distancia E3, o simplemente, la ruta E3, tiene 6950 kilómetros de longitud y discurre desde la costa de Portugal hasta el Mar Negro en Bulgaria. La E3 atraviesa Portugal, España, Francia, Luxemburgo, Bélgica, Alemania, la República Checa, Eslovaquia, un pequeño tramo de Polonia, Hungría y Bulgaria. La parte española de la E3 sigue el Camino de Santiago, en concreto el Camino Francés, entre Santiago de Compostela y Francia. Dicho tramo es recorrido cada año por cientos de miles de personas.

En España, en el contexto del «*Plan Estratégico de Infraestructuras de Transporte, PEIT*», la Dirección General de Carreteras ha realizado distintos trabajos para la identificación de los caminos históricos en España y su confluencia y conflicto con la Red de Carreteras. El objetivo que se persigue es mejorar la seguridad en las carreteras del estado y mejorar la calidad y homogeneidad de los itinerarios históricos transitados por medios no motorizados (pie, bicicleta, caballo,...). Fruto de este trabajo es, por ejemplo, la norma «*Señalización del Camino de Santiago*» (*Dirección General de Carreteras*, 2008).

El caso de los inventarios de carreteras y caminos tras un desastre natural, como en el caso de los terremotos, merece una consideración especial. Siendo cierto que en la mayoría de los casos se trata de inventariar carreteras tradicionales, las variables que es necesario inventariar para facilitar la movilidad de la población y de los equipos de emergencias son muy diferentes que las que se utilizan en la gestión habitual de las carreteras (*Franchin et al.*, 2006). Hay que destacar aquí, que en el caso de las catástrofes naturales, como los terremotos o inundaciones, aunque estas se produzcan en una región desarrollada que disponga de buenas cartografías, la catástrofe hace que dicha cartografía deje de ser válida, pues la mayor parte de los caminos e infraestructuras quedan afectados

y es necesario volver a comprobar su estado tras la catástrofe. En esas situaciones, los datos cambian en cuestión de horas o días. Cada sección de una carretera puede pasar del estado «*intransitable*», al estado «*transitable solo por vehículos todo-terreno*» o «*transitable solo por vehículos ligeros*» o a cualquier otro estado. En esas situaciones puede ser importante inventariar la existencia de escombros, socavones, deslizamientos de taludes o el estado general de los puentes y otras estructuras. La necesidad de actualizar el valor de todas estas variables con una frecuencia alta y la utilización para estas tomas de datos de personal no especializado en la realización de inventarios de carreteras hace que los métodos tradicionales para la toma de datos y los equipos y herramientas disponibles para la realización de los inventarios no sean de mucha utilidad (*Ginige et al.*, 2014).

Un ejemplo de una herramienta que ha demostrado su utilidad en el inventario de infraestructuras tras terremotos como los ocurridos en Haití en 2010, en Nepal en 2015 o en Ecuador en 2016, es el Gestor de Tareas (*Task Manager*) de Humanitarian OpenStreetMap Team. Esta herramienta está diseñada para trabajar con el modelo de datos de OpenStreetMap y permite el trabajo colaborativo de cientos o miles de personas que identifican los elementos seleccionados a partir de imágenes de satélite de alta definición tomadas con posterioridad al desastre. Simultáneamente, otros equipos de colaboradores situados en el lugar de la catástrofe aportan trazas GPS y confirmación visual del estado de los elementos. Cuando se utiliza el *Task Manager*, la base de datos de OpenStreetMap queda actualizada en directo y proporciona una herramienta a los equipos de emergencias encargados de la distribución de ayuda y asistencia a las poblaciones afectadas (*Meier*, 2015; *Humanitarian OpenStreetMap Team*, 2016). Se han propuesto otras herramientas para la geo-colaboración en la respuesta y coordinación tras los desastres. Por ejemplo, Schafer et al. (2007) proponen una herramienta basada en hojas de cálculo estándar (*Schafer et al.*, 2007).

2.5.4 Formatos para el almacenamiento de datos

Un aspecto importante a tener en cuenta en las aplicaciones informáticas y estándares mencionados es el formato en el que se almacenan los datos registrados. Todas estas herramientas necesitan intercambiar información, lo que fuerza a la creación de algún tipo de «*idioma*» común que permita describir los elementos de las vías de forma que puedan ser *entendidos* por los distintos programas de ordenador y agentes implicados en los procesos de diseño, construcción y explotación de las carreteras.

La codificación estandarizada de datos se ha controlado tradicionalmente por los propios fabricantes de *software*, que imponían sus estándares *de facto*. Cada compañía de software (*ESRI*, *AutoDesk*, *Intergraph*, *MapInfo*) ha dispuesto de su propio formato (SHAPE, DWG, DGN, MID, MIF,...). Los cambios de formato entre unos y otros sistemas exigían a menudo de un formato de intercambio que acababa convirtiéndose a su vez como estándar *de facto*. Ese es el caso del formato de datos DXF (*Bernabé Poveda and López Vázquez, 2012*).

Durante la fase de diseño y construcción de las infraestructuras, se ha extendido el uso de programas de diseño asistido, las denominadas herramientas CAD, *Computer Aided Design*. Este tipo de herramientas ponen el énfasis en la componente espacial de la información, ofreciendo ayudas al dibujo detallado de los elementos y a la generación automática de los planos constructivos. Este tipo de formatos permiten que se asocien atributos gráficos a los objetos, tales como el color, estilo de línea, etc., y otros relacionados con el objetivo del dibujo, como podría ser el tipo de material y los factores de productividad, entre otros. Si bien todos estos programas presentan alguna forma de gestionar la información temática de los elementos necesaria en los inventarios de carreteras, suelen ser herramientas poco útiles en este sentido. Son herramientas cuya mayor utilidad se da en las fases de diseño y construcción de las infraestructuras. Los formatos CAD más utilizados en la actualidad son los siguientes (*Barriga Vargas et al., 2012*):

- DWG (*Drawing*), DXF (*Drawing Exchange Format*), de la empresa Autodesk Inc.
- DGN (*Microstation Design Files*), de Bentley Systems.
- CDR (*Corel Draw*) de Corel Corporation

Durante la fase de explotación de las carreteras se parte de unas geometrías ya definidas para los elementos. Se suele utilizar un conjunto de vías y sus elementos asociados de manera conjunta. La parte temática de la información adquiere mayor relevancia que durante la fase de diseño. Pueden interesar factores como el estado de conservación del pavimento, o las intervenciones realizadas en determinado tramo, por poner un par de ejemplos. Esto implica interactuar con bases de datos que almacenan la información y que a veces están en distintos servidores accesibles a través de la red. Tradicionalmente ha sido el campo de los *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. En ellos, las herramientas de edición de las geometrías suelen ser más básicas que las ofrecidas por los programas CAD, pero ofrecen a cambio herramientas muy potentes para manejar la información de bases de datos espaciales y para la realización de operaciones de análisis espacial (intersecciones, zonas de influencia, cálculo de rutas, visibilidad, etc.). En los últimos años han ido adquiriendo importancia el BIM (Building Information

Modeling). Se trata del proceso de generación y gestión de datos de una construcción durante su ciclo de vida utilizando software dinámico de modelado en tres dimensiones y en tiempo real, integrando las fases de diseño y construcción. Este proceso produce el modelo de información del edificio (también abreviado BIM), que abarca la geometría del edificio, las relaciones espaciales, la información geográfica, así como las cantidades y las propiedades de sus componentes.

Seguramente el formato estándar más elemental en el que se pueden almacenar los datos es el formato CSV (*Comma Separated Values*). Este formato permite almacenar en texto plano datos tabulares del tipo registros (filas) y campos (columnas). Para ello, se escribe en el dispositivo de almacenamiento una línea de datos por cada registro. Dentro de cada línea los distintos campos se separan por una *coma*. Los ficheros pueden llevar opcionalmente una o más líneas iniciales describiendo las cabeceras de las columnas de datos o aportando otro tipo de metadatos. Es posible utilizar como separador otro carácter diferente de la coma, por ejemplo, *punto y coma*, *espacio* o el *tabulador* (Shafranovich, 2005).

De acuerdo con Halfawy (2010), un modelo de datos debe de estar basado, tanto como sea posible, en los formatos estándares de datos espaciales disponibles (Halfawy, 2010). Los formatos de datos geoespaciales más utilizados para información de tipo vectorial, que es la que mejor se adapta a la descripción de las carreteras, son:

Shapefile (*Environmental Systems Research Institute*, 1998) es un formato para datos geográficos vectoriales, inicialmente desarrollado por la empresa *Environmental Systems Research Institute, Inc.(ESRI)* como formato de datos cerrado y actualmente disponible en abierto. Da lugar a los conocidos ficheros de extensión *.shp*. Si bien el formato *Shapefile* ha sido durante muchos años el estándar *de facto* para las capas de datos vectoriales, a día de hoy ha sido sobrepasado en prestaciones por formatos de datos más actualizados. Es un formato que sólo admite un tipo de geometría en cada capa y que presenta ciertas limitaciones en la parte temática de la información correspondiente a las entidades de la capa. Distribuye la información de cada capa entre varios ficheros codificados en binario, lo que también supone un handicap en la utilización e interpretación de la información de las capas de datos. Aun así, sigue siendo el formato de datos más utilizado para el intercambio de información vectorial entre los programas de Sistemas de Información Geográfica.

Geographic Markup Language (GML) (Portele et al., 2007) es un formato estándar de datos promovido por el *Open Geospatial Consortium, OGC*, basado en la codificación *XML* e inicialmente concebido para el intercambio de datos vectoriales. El GML proporciona herramientas para la definición de entidades

vectoriales 2D y 3D, simples o complejas. Su gran flexibilidad es, al mismo tiempo, su punto fuerte y su debilidad. Un conjunto de datos codificado en GML requiere la definición previa de los tipos de entidades a partir de propiedades espaciales definidas por el GML y de atributos temáticos definidos con tipos básicos XML o por tipos complejos personalizables (*Bernabé Poveda and López Vázquez, 2012*). El formato GML es complicado y difícil de implementar, pero puede servir, y de hecho sirve, para implementar inventarios de carreteras. El modelo de datos EuroroadS, promovido por la Unión Europea, está basado en el GML versión 3.1 (*Svard, 2006*).

KML es un estándar desarrollado inicialmente fuera del OGC por las empresas *Keyhole* y *Google*, pero que actualmente forma parte de los estándares mantenidos y promovidos por el OGC. KML es la codificación XML nativa del programa *Google Earth* (*Google Inc, 2014*). Es inherentemente 3D y está pensado para la presentación final de los datos, no para su almacenamiento y análisis (*Bermudez et al., 2012*). El formato KML se adapta mal a la interconexión entre diferentes bases de datos y está pensado más bien para aplicaciones de WEB Mapping (*Open Geospatial Consortium, 2015*).

De estos formatos de datos, sólo dos, *GML* y *KML*, pertenecen al conjunto de estándares del OGC. La organización internacional *Open Geospatial Consortium* está formada por agencias gubernamentales, universidades, compañías y centros de investigación, y tiene como misión promover el uso de estándares y tecnologías abiertas en el área de sistemas y tecnologías de la información geográfica y afines. La mayoría de los estándares OGC utilizan como base de codificación el estándar W3C XML «*Lenguaje Extensible de Marcado*» (*Extensible Markup Language*). El lenguaje XML fue desarrollado por el *World Wide Web Consortium* (W3C) que lo propone como un estándar para el intercambio de información estructurada entre diferentes plataformas. Una de las ventajas de este lenguaje o formato de datos es que es comprensible tanto por los ordenadores como por los humanos. Se dice que XML es «*humanamente legible*» (*World Wide Web Consortium, 2013; Vladimir Gutiérrez et al., 2012*).

En el apartado anterior se han mencionado los principales modelos de datos estándares existentes para inventarios de carreteras (*LandXML, GML, Euroroads,...*). Todos ellos describen los componentes de su modelo de datos utilizando adaptaciones del formato XML. Esto da lugar a que la información de los inventarios basados en dichos estándares sea posible expresarla en el formato XML, pero no implica que las aplicaciones informáticas utilicen dicho formato para el almacenamiento o análisis de los datos. Lo habitual es que las aplicaciones informáticas utilicen internamente sus propios formatos para el tratamiento y el

análisis de la información contenida en los inventarios. En concreto, lo habitual es que las aplicaciones informáticas utilicen internamente Sistemas Gestores de Bases de Datos Relacionales para el almacenamiento y análisis de toda la información correspondiente a los inventarios. A lo que sí están obligadas todas las aplicaciones informáticas, si quieren afirmar que implementan determinado estándar, es a ser capaces de leer (importar) o escribir (exportar) la información de los inventarios en ficheros en el formato XML del estándar.

Las aplicaciones informáticas destinadas a los inventarios de carreteras necesitan leer, escribir o analizar información procedente de diferentes sensores. La mayoría de las aplicaciones comerciales utilizan formatos propios para el tratamiento de la información procedente de sensores. Una vez más, estos formatos, al no ser abiertos, ni estándares, ni estar documentados, no permiten su reutilización para otros fines que los previstos por el fabricante o desarrollador concreto.

Para la grabación de las trazas GPS se dispone de varios formatos estándares abiertos: GPX, KML, GML y otros. El OGC ha promovido varios estándares en relación con la publicación y descubrimiento de sensores, transductores y repositorios de datos de sensores, si bien estos formatos de datos están más orientados a la publicación de los datos a través de servicios web que a la forma de registrar la información de los sensores. El más destacado es el SOS (*Sensor Observation Service Interface Standar*). Todos ellos están basados en el lenguaje XML (*Bröring et al., 2012*).

GPX, *GPS eXchange Format*, es un formato basado en XML que fue desarrollado por la empresa *Topographix* y que ellos mismos definen como: «*un formato ligero XML para el intercambio de datos procedentes de GPS (puntos de paso, rutas y trazas) entre aplicaciones y servicios WEB*». GPX se ha convertido en un estándar de facto para el almacenamiento y transmisión de información procedente de los dispositivos GNSS (*Foster, 2004*). Existen numerosas herramientas que permiten visualizar la información contenida en un archivo GPX o bien convertirla a otros formatos vectoriales más habituales en los Sistemas de Información Geográfica, como el formato shapefile de ESRI. Una herramienta de referencia en ese sentido es la librería *GDAL*, desarrollada y mantenida por OSGeo (*Open Source Geospatial Foundation, 2016*). El lenguaje GPX es reconocido por los programas SIG.

Una característica del lenguaje GPX, por tratarse de una extensión del lenguaje XML, es que, si bien está destinado a transmitir información entre aplicaciones informáticas, es *humanamente legible*, esto es, no es difícil comprender la información contenida en un documento GPX mediante una simple lectura del

mismo. Otra característica interesante del formato GPX es que permite lo que los autores llaman *extensiones*. Consiste en la posibilidad de añadir a cada *way point*, *track* o *route* almacenado, información adicional a definir por el productor de la información.

2.5.5 El modelo y formato de datos de OpenStreetMap

OpenStreetMap es una base de datos de información geográfica que ofrece un mapa mundi WEB, similar al ofrecido por Google pero que, a diferencia de este, está desarrollado y mantenido por una comunidad de usuarios voluntarios. Funciona de manera similar a la wikipedia (de hecho se le suele denominar «*la wikipedia de los mapas*»). Millones de usuarios repartidos por todo el mundo añaden libremente elementos al mapa y financian, mediante aportaciones voluntarias, los costes de mantenimiento de los servidores que alojan la información. Al mismo tiempo, miles de programadores, repartidos igualmente por todo el planeta, desarrollan herramientas de software libre que permiten explotar la información contenida en las bases de datos de OpenStreetMap. El proyecto nació en el Reino Unido, en el año 2004. Su creador fue Steve Coast. En la actualidad hay más de dos millones y medio de usuarios registrados y cerca de tres mil quinientos millones de elementos tipo *Node* almacenados en las bases de datos (Coast, 2004; Higuera de Frutos, 2016; Bennet, 2010; Ramm et al., 2011).

OpenStreetMap utiliza un modelo de datos de uso general muy flexible para el análisis y tratamiento de información geográfica en formato vectorial. Utiliza el formato de datos *OSM* para el intercambio de información, que da lugar a los ficheros con extensión *.osm*. *OSM* es un formato de datos de la familia de formatos basados en el estándar XML. El formato *OSM* fue inicialmente desarrollado por *OpenStreetMap* y actualmente está reconocido como un estándar para transmitir información vectorial GIS. El formato *OSM* aporta numerosas ventajas que se detallan en los siguientes párrafos.

El formato *OSM* está basado en el estándar *XML*, lo que permite que sea comprendido por los ordenadores y utilizado a través lenguajes de programación, pero también que sea humanamente legible, esto es, leyendo los listados *OSM* se comprende fácilmente la información que contienen e incluso se puede modificar esta utilizando simplemente un editor de textos.

Un fichero *.osm* es una capa vectorial GIS que permite el almacenamiento de varios tipos de geometría en el mismo fichero. Como se ha indicado en los apartados anteriores, tradicionalmente las capas de información vectorial GIS utilizaban el formato *shapefile* de ESRI, que da lugar a los conocidos ficheros *.shp*

(*Environmental System Research Institute*, 1998). Las capas vectoriales *.shp* tienen muchas limitaciones, entre otras, que cada capa solo puede contener un tipo de geometría. En los últimos años han aparecido otros formatos estándares para capas vectoriales de información que permiten almacenar en cada capa (en cada fichero) elementos con diferentes tipos de geometría. Así se pueden guardar en una misma capa (en un mismo fichero) elementos con geometría *Point* junto a otros con geometría *Line* o cualquier otra. Hay otros formatos de datos actualmente que permiten la incorporación de varios tipos de geometrías en un mismo fichero. Se han mencionado anteriormente los formatos KML (*Keyhole Markup Language*) y GML (*Geographic Markup Language*). En estos tipos de formatos de datos multi-geometría, es posible encontrar en una misma capa o fichero elementos con geometría *Point*, *LineString*, *Polygon*, *MultiPoint*, *MultiLineString* y *MultiPolygon*, que son las geometrías en dos dimensiones reconocidas tanto por la ISO (*International Organization for Standardization*) como por el OGC (*Open Geospatial Consortium*) (*International Organization for Standardization*, 2004a,b). De hecho, el formato *.osm* permite modelizar geometrías más complejas, como podrían ser curvas, espirales, clotoides o cualquier otra.

El formato *OSM* permite una interacción cómoda con las bases de datos. Además, el formato *OSM* permite todo tipo de ampliaciones y adaptaciones de la información a los diferentes usos que quieran darle los distintos usuarios.

Actualmente, todos los programas GIS de escritorio reconocen el formato *OSM* como formato vectorial. Es el caso de ArcGIS, QGIS, gvSIG, GRASS y otros. Todos ellos son capaces de leer, visualizar y editar la información contenida en los ficheros *.osm*. También permiten la exportación desde el formato *OSM* a otros formatos vectoriales, incluido el propio formato *shapefile* o el formato *KML*. También las herramientas clásicas de análisis espacial, como la *Geospatial Data Abstraction Library* (*GDAL*), incluyen métodos para leer y convertir a otros formatos la información de los ficheros *.osm* (*Open Source Geospatial Foundation*, 2016).

Otro punto fuerte del formato *OSM* es que existen numerosas herramientas de software libre a disposición de los programadores que permiten realizar de manera eficiente la exportación de la información de los ficheros *.osm* a bases de datos espaciales, por ejemplo a PostgreSQL, PostGIS y otras. Esta importación es posible hacerla también desde dentro de los propios programas GIS de escritorio mencionados en el párrafo anterior (*Martínez Llario*, 2012; *Obe and Hsu*, 2011; *Omniscale GmbH and Co. KG*, 2016).

Existen también potentes herramientas de software libre que permiten la edición, consulta y transformación de la información en formato *OSM* trabajando directamente sobre los ficheros *.osm*. Un buen ejemplo es el programa *JOSM*

(*OpenStreetMap*, 2016). *JOSM* es un programa tipo CAD que permite trabajar de manera muy completa con la información procedente de ficheros *.osm*. Dispone de numerosos complementos que posibilitan, por ejemplo, la importación de ficheros en otros formatos, como el *shapefile* de ESRI o el *.dwg* de Autocad, o el *.gpx* procedente de dispositivos GNSS. También dispone de un complemento específico para gestionar las señales de tráfico, que proporciona datos, imágenes y referencias estandarizadas de las señales de tráfico utilizadas en un gran número de países (*OpenStreetMap*, 2015).

La visualización de las capas en formato *OSM* se puede abordar, no sólo desde los programas mencionados anteriormente, sino que también existen librerías específicas de software libre para facilitar la realización de interfaces gráficas desde distintos lenguajes de programación, lo que facilita la creación de aplicaciones personalizadas a los diferentes agentes interesados. Existen librerías de visualización para los lenguajes Java, C, Python, Javascript y otros (*Pourabdollah et al.*, 2013; *Pérez Santiago*, 2012; *Westra*, 2016).

2.6 RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TRAZADO

Para estudiar el trazado de las carreteras, se analizan por separado la «*planta*» y el «*perfil longitudinal*». La «*planta*» está formada por la proyección (x, y) de los puntos del eje de la carretera sobre el plano horizontal. El «*perfil longitudinal*» está definido por las coordenadas (s, z) , siendo s la medida de la longitud recorrida a lo largo del eje de la carretera, desde el origen del tramo hasta el punto en cuestión, y z la altitud respecto de determinado plano de referencia.

El conocimiento de las características geométricas de una carretera es importante para una correcta gestión y explotación de la misma, para el análisis y mejora de su seguridad vial y para proyectar futuras ampliaciones. En los estudios relativos a la seguridad, así como en los proyectos de rehabilitación o mejora de la infraestructura de una carretera, se necesita un conocimiento preciso de la geometría de las distintas alineaciones, tanto de la geometría en planta como de la geometría del perfil longitudinal y de su sección transversal. Incluso la actitud de los conductores está influenciada por dichas características geométricas (*Garach et al.*, 2014a).

No se suele disponer de información suficientemente precisa de la geometría en las carreteras ya construidas. Hay ocasiones en que no están disponibles los documentos del proyecto; otras veces, la carretera ha sufrido modificaciones a lo largo de su construcción o de su explotación que no han quedado debidamente reflejadas en la documentación disponible. Por ello, es usual proceder a la recogida

periódica de información y realizar los cálculos necesarios para determinar la geometría.

El proceso de obtención de la geometría de una carretera a partir de una serie de datos discreta se denomina «*reconstrucción del trazado*» o también «*extracción o reconstrucción de la geometría*». El proceso consta de dos fases: la recogida de datos de la carretera y el cálculo de la geometría en base a dichos datos. Esto es, a partir de datos de una carretera en servicio, recogidos mediante la utilización de diferentes procedimientos, se procede a calcular las alineaciones horizontales (rectas, curvas circulares y curvas de transición), el perfil longitudinal (rampas, pendientes y acuerdos parabólicos) y la sección transversal, de forma que al final se obtenga un modelo geométrico completo de la carretera.

2.6.1 Determinación del eje de la carretera

La toma de datos para la determinación del eje de la carretera en servicio se puede hacer por distintos procedimientos. El más preciso es el levantamiento topográfico sobre el terreno, pero es un procedimiento lento, de coste elevado y, sobre todo, que conlleva riesgos altos para el personal encargado de su ejecución.

Una posible fuente de obtención de datos son las fotografías aéreas o de satélite. Algunos autores utilizan algoritmos SIG de detección de bordes aplicados sobre las fotografías para extraer las líneas de las carreteras. Este procedimiento tiene el inconveniente de depender en gran medida de la calidad y resolución de dichas fotografías (*Easa et al.*, 2007; *Dong et al.*, 2007; *Tsai et al.*, 2010). Otros autores digitalizan manualmente una colección de puntos siguiendo el trazado de la carretera sobre las fotografías (*Camacho-Torregrosa et al.*, 2015). En ambos casos, la información que se obtiene es sólo información relativa a la geometría en planta, ninguno de los dos procedimientos proporciona datos de altitud. Se puede combinar alguno de los procedimientos anteriores con la utilización de cartografía de Modelos Digitales de Elevaciones para obtener el dato de altitud de las líneas (*Castro et al.*, 2011; *Boucher*, 2013).

Para la obtención de los puntos del eje de la carretera también se utilizan sistemas de posicionamiento por satélite montados sobre un vehículo que recorra la vía. Estos dispositivos se denominan de manera general *Global Navigation Satellite System*, *GNSS*. También se denominan sistemas *GPS*, si bien las siglas *GPS* corresponden al sistema de posicionamiento de EEUU, que era el único que había disponible hasta hace unos años. Actualmente, en Europa, es posible leer la señal de los satélites correspondientes al sistema GLONASS ruso y al sistema Galileo de la Unión Europea. En Asia-Pacífico se puede acceder también el

sistema GNSS chino, denominado BeiDou, que es el nombre con que se conoce a la constelación de la Osa Mayor en la astronomía china (*National Oceanic and Atmospheric Agency*, 2016; *European GNSS Agency*, 2016; *Russian Federal Space Agency*, 2016; *China National Space Administration*, 2016).

Los dispositivos GNSS van registrando las coordenadas de los puntos del recorrido a intervalos de tiempo regulares. La frecuencia de los puntos depende de las características de los aparatos utilizados, pudiendo variar entre una posición cada segundo en un *smartphone* de gama alta y diez posiciones por segundo en un dispositivo GNSS profesional de gama alta. Con estas frecuencias de muestreo, la distancia entre dos puntos sucesivos en un vehículo que recorra la vía a 80 Km/h será de unos 20 metros en el caso del *smartphone* y de unos 2 metros en el caso de los aparatos profesionales de alta gama.

El resultado que entregan los dispositivos GNSS es una lista ordenada con las coordenadas de los puntos del recorrido, en el sistema de referencia WGS84 (*National Imagery Mapping Agency*, 2000). Esta serie de puntos procedentes de un dispositivo GNSS se denomina la «traza» del recorrido, en inglés, el «*track*» del recorrido. La *traza* del recorrido está compuesta por una colección ordenada de puntos en tres dimensiones, de los que se conocen sus coordenadas *longitud*, *latitud* y *altitud*, normalmente referidas al sistema de referencia WGS-84.

Lo habitual es que el vehículo de medida recorra la carretera por uno de los carriles de circulación, por lo que es necesario aplicar procedimientos que permitan determinar el eje de la carretera a partir de las trazas, procedentes del aparato de medida. En carreteras de una sola calzada y un carril por sentido se puede recorrer la carretera una vez en cada sentido y tomar como eje los puntos medios de las dos trazas GPS (*Castro et al.*, 2006). También se pueden tomar varias trazas de la misma carretera y establecer algún procedimiento para determinar el eje a partir de la información de las mismas. Se puede promediar el eje de la carretera a partir de las trazas obtenidas de diversos vehículos (*Pérez Zuriaga*, 2012; *García García and Camacho Torregrosa*, 2009). Liu et al. utilizan las trazas de dos mil taxis de Shanghai emitiendo simultáneamente para establecer el mapa callejero del 93 % de la ciudad en una hora y media (*Liu et al.*, 2012).

La utilización de equipos dotados de *corrección diferencial*, denominados *DGPS* (Dynamic Global Positioning System), permite alcanzar precisiones sub-métricas. La corrección diferencial se basa en combinar la información del dispositivo GNSS montado en el vehículo con la información procedente de un equipo GNSS fijo en tierra en un punto del que se conocen con precisión sus coordenadas. El error en la medida de las coordenadas del punto fijo en cada instante de tiempo se aplica para corregir las posiciones obtenidas en el GNSS

embarcado en el vehículo. Baass y Vouland (2005) indican en su estudio que la precisión de los datos GPS con corrección diferencial estimada por el Ministerio de Transporte de Canadá es de 25 cm en horizontal y 50 cm en vertical (*Baass and Vouland, 2005*).

Se ha trabajado en la mejora de la precisión obtenida por el GPS incorporando la información proporcionada por otros sensores inerciales, como el acelerómetro. Es lo que se denominan *sistemas de navegación inercial*. Una unidad de medición inercial o IMU (del inglés *Inertial Measurement Unit*), es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos. El procedimiento se basa en que, conocidas la posición y velocidad inicial del vehículo, y conocidas las aceleraciones instantáneas, es posible integrar la trayectoria. En este caso el error en la determinación de la posición aumenta con la distancia recorrida desde el punto fijo. Este procedimiento es muy útil en zonas donde, por algún motivo, se pierde la cobertura GNSS, como es el caso de los túneles. Jiménez et al. (2009) utilizan como posición inicial la proporcionada por un GPS y calculan la máxima distancia que es posible recorrer integrando la trayectoria antes de tener que volver a tomar posición del GPS. También proponen un procedimiento para poder filtrar la influencia de las aceleraciones dinámicas en la determinación de valores como las pendientes de la carretera a partir de dichos sensores inerciales (*Jiménez et al., 2009*). Por su parte, Martí et al. (2012) desarrollan algoritmos que permiten combinar la información procedente de dispositivos DGPS con la información procedente de una IMU y proponen aplicar los resultados al desarrollo de sistemas automáticos de conducción (*Martí et al., 2012*).

Uno de los problemas que aparecen al utilizar sistemas de posicionamiento GNSS, para la realización de inventarios de carreteras, es la poca precisión que proporcionan en la medición de las altitudes. Hay varias líneas de investigación que tratan de mejorar el posicionamiento proporcionado por los GNSS combinando la información de los mismos con la información procedente de otros sensores. Recientemente Boroujeni et al. (2013) han tratado de complementar la altitud obtenida con el dispositivo GNSS con el dato de presión atmosférica proporcionado por un barómetro. En concreto, Boroujeni et al. utilizan los datos proporcionados por un equipo GPS de bajo coste equipado con un barómetro altimétrico para calcular la pendiente media de una carretera y realizan un estudio del nivel de emisión de gases contaminantes en los vehículos en función de la pendiente de la carretera (*Boroujeni et al., 2013*). Bai y Wang (2008), de la Universidad de Nottingham, tratan de incrementar la precisión del posicionamiento del vehículo complementando la información proporcionada por el GPS con la aportada por la

cámara de vídeo y la de los datos GIS de la vía por la que se circula (*Bai and Wang, 2008*). Limsoonthrakul et al. (2009) proponen mejorar la capacidad de geolocalización complementando la información procedente del GPS con la procedente del sensor magnético y de la cámara de vídeo (*Limsoonthrakul et al., 2009*). Boucher (2013) combinó la información procedente de dos receptores GPS, con la información de *Modelos Digitales de Elevaciones* existentes en fuentes cartográficas públicas y la procedente de la base de datos de OpenStreetMap para obtener la proyección en planta y la altura de los puntos del eje de una carretera (*Boucher, 2013*).

Las casas comerciales dedicadas a la realización de inventarios, en general, utilizan técnicas y equipos similares para la recogida de datos y procesamiento de las curvaturas. Dichos equipos incluyen giróscopos, odómetros, clinómetros y unidades GPS. Los datos se van registrando de manera continua mientras el vehículo recorre la vía utilizando giróscopos de alta precisión para determinar la inclinación lateral y longitudinal del vehículo y sincronizando dichas medidas con la obtenida de los odómetros y del GPS. La frecuencia de recogida de los datos varía en función de la velocidad de recorrido, la precisión requerida y el tipo concreto de equipo utilizado. Los equipos utilizados actualmente permiten recoger datos cada pocos centímetros (*Saura López et al., 2010; Findley et al., 2013*).

2.6.2 Reconstrucción de la geometría de la planta

La geometría en planta de la carretera queda definida mediante el radio de curvatura en cada punto del eje, caracterizando los tramos como rectas, curvas de transición y curvas circulares. Hay numerosos autores que han publicado estudios acerca de como obtener el radio de curvatura de los distintos puntos del eje de la carretera (*David Ben-Arieh and Zhang, 2004; Carlson et al., 2005; Imran and Hassan, 2006; Castro et al., 2006; Cafiso and Graziano, 2008; Jiménez et al., 2009; Tong et al., 2010; Tsai et al., 2010; Gikas and Stratakis, 2011; Di Mascio et al., 2012; Garach et al., 2014b; Camacho-Torregrosa et al., 2015*). El procedimiento más preciso es realizar el levantamiento topográfico de la curva en el terreno. También se puede deducir el radio de curvatura a partir de las coordenadas de los puntos del eje, previamente obtenidas mediante dispositivos GNSS, digitalización de fotografías aéreas u otros procedimientos. Para ello se utilizan procedimientos matemáticos que estiman las propiedades geométricas de la sucesión de puntos del eje. Se han documentado diversos procedimientos basados en la aproximación mediante splines (*Castro et al., 2006; Cafiso and Graziano, 2008*), en la aproximación por mínimos cuadrados (*Imran and Hassan, 2006; Tong et al., 2010*) y en la variación del azimut (*Baass and Vouland, 2005*;

Gikas and Stratakos, 2011; Camacho-Torregrosa et al., 2015).

Carlson et al. identificaron y evaluaron diez métodos de estimación del radio de curvatura. De los diez métodos identificados, dos fueron descartados de la evaluación global debido a exceso de ruido en los datos correspondientes. Los ocho procedimientos restantes fueron evaluados para analizar sus ventajas e inconvenientes en el levantamiento de una curva horizontal. En la investigación se utilizaron 18 curvas. Las curvas corresponden a tramos de carretera de una calzada y dos carriles situadas en los distritos de Bryan y Waco, dependientes del *Texas Department of Transportation* en Estados Unidos. Las curvas analizadas eran sencillas, con un solo radio y sin curva de transición. Los métodos de estimación utilizados fueron: clinómetro básico analógico, clinómetro digital avanzado, medida de la cuerda de la curva, compás (brújula), replanteo en el terreno, receptor GNSS, acelerómetro lateral, planos del proyecto, señales de limitación de la velocidad previas a la curva e inclinación lateral del vehículo. El radio estimado con cada método se comparó con el radio «*real*» hallado mediante replanteo en el terreno. Para el replanteo se utilizó una estación total. La conclusión que se extrajo de este estudio fue que ninguno de los métodos analizados proporcionaba una precisión mucho mayor que los otros, utilizando un nivel de confianza del 95 %. Sin embargo, la determinación a partir de los planos y mediante el uso de receptores GNSS proporcionó los resultados más precisos, en el sentido de menores errores medios relativos, con un 0.9 % y 1.2 %, respectivamente (*Carlson et al., 2005*).

Findley et al. también han comparado distintos métodos de obtener el radio de curvatura. El estudio compara cinco procedimientos de obtener el radio de curvatura: (1) replanteando en el terreno, (2) mediante software GIS, (3) a partir de los datos de inventario, (4) a partir de los datos de proyecto y (5) a partir de los resultados proporcionados por tres casas comerciales para el *National Workshop on Highway Asset Inventory and Data Collection*. El error medio de los distintos procedimientos es del 35 %, y el error medio de las tres casas comerciales del 30 %. En el mismo estudio se analizó el error cometido en la determinación de la longitud de las curvas obteniéndose un error medio del 25 % para todos los procedimientos y de un 21 % para las tres casas comerciales (*Findley et al., 2013; Cunningham and Findley, 2013*).

Las investigaciones sobre la reconstrucción mediante procedimientos matemáticos de la geometría del eje de la carretera a partir de datos procedentes de dispositivos GNSS, digitalización de fotografías aéreas u otros comenzaron a principios de este siglo, siendo pioneros en ese sentido, entre otros, los trabajos de Ben-Arieh (*David Ben-Arieh and Zhang, 2004*) y María Castro (*Castro et al., 2006*).

El dato de partida para el problema suele ser la *traza* del eje de un determinado tramo de carretera. Aquí se utiliza el concepto de *traza* en el sentido de datos de coordenadas, azimut, pendiente u otros correspondientes a una serie discreta de puntos espaciados y ordenados tomados a lo largo del eje de la vía. Las coordenadas de esos puntos pueden proceder de recorridos realizados con un vehículo dotado de GNSS, de la digitalización de fotografías o de otros procedimientos.

El problema a resolver es el cálculo de la geometría de las distintas alineaciones que componen el trazado, determinando el tipo de alineación (Recta, Curva de Transición o Curva Circular), sus parámetros geométricos y sus puntos de inicio y final. En la práctica, el problema se puede descomponer en tres problemas diferenciados:

1. Determinación de los puntos de inicio y final de las distintas alineaciones
2. Determinación del tipo y parámetros geométricos de cada una de las alineaciones.
3. Evaluación de la precisión alcanzada

Drakopoulos y Ertan señalan en su estudio que el principal desafío al extraer la información de planta (como la longitud de la curva y su curvatura) a partir de información recogida en una serie de puntos discreta, es la correcta identificación de los puntos de inicio y final de la curva. Pese a que dibujar la proyección en planta a partir de información digital es sencillo, y los puntos de inicio y final de las curvas son relativamente fáciles de identificar visualmente, la presencia de '*ruido*', inherente a los datos digitales, hace necesario software bastante complejo para automatizar la detección de curvas y garantizar su precisión (*Drakopoulos and Örnek*, 2000). También Baass y Vouland (2005) inciden en la importancia que tiene la determinación de los puntos de inicio y final de las distintas alineaciones, tanto en planta como en alzado, para la correcta reconstrucción de la geometría del eje de las carreteras a partir de datos de la traza (*Baass and Vouland*, 2005).

Los programas comerciales de trazado de carreteras utilizan básicamente herramientas CAD para la definición y el ajuste de los puntos frontera entre las distintas alineaciones. Es el usuario, el que va fijando la posición de los puntos frontera en base a distintas ayudas que ofrecen los programas. Es el caso del programa *In Roads*, de Bentley que ofrece el diagrama de curvaturas calculado en base a los puntos de la traza para que el usuario fije, mueva y ajuste los puntos frontera entre alineaciones. Una vez definido el inicio y el final de cada tramo, el programa realiza un ajuste por mínimos cuadrados de los datos (*Bentley*, 2014). En el caso del programa de trazado *Trivium*, el programa calcula una selección de puntos frontera y ofrece al usuario la opción de utilizar el diagrama de curvaturas o

el de pendientes, para que, mediante herramientas de edición CAD, ajuste los inicios y finales de tramos. Al igual que en el caso anterior, una vez fijados los puntos frontera que definen las alineaciones el programa calcula los parámetros de las mismas (Puy, 2016). Un procedimiento parecido de iteración en pantalla con las trazas de los recorridos es el que utilizaron Karamanou et al. (2009) para reconstruir la geometría de la planta y del perfil longitudinal (Karamanou et al., 2009).

2.6.2.1. Métodos basados en la variación del azimut

Hay una serie de autores que han utilizado la variación del azimut de la carretera a lo largo de su recorrido, para reconstruir la geometría de la proyección en planta de la misma. Drakopoulos y Ertan utilizan un vehículo dotado de un odómetro para medir distancia recorrida, un giróscopo para medir pendiente longitudinal y peralte, y un compás (brújula) para medir el azimut. Menciona algunas de las desventajas de utilizar datos procedentes de dispositivos GNSS, como es la pérdida de precisión bajo determinadas condiciones atmosféricas o geográficas, la pérdida de señal en áreas con mucha vegetación o terrenos boscosos, también en túneles y en zonas urbanas. También menciona que los dispositivos GNSS toman datos cada cierto intervalo de tiempo, por lo que la distancia entre dos datos sucesivos depende de la velocidad de recorrido del vehículo. El vehículo que utilizaron tomaba datos de los cuatro valores brutos cada 16.1 metros. Para la reconstrucción de la geometría del eje, dividen la carretera en lo que denominan «segmentos». Hay nueve tipos de segmentos, cada uno formado por la combinación de su tipo de alineación horizontal (recta, curva a derecha o curva a izquierda) con su tipo de alineación vertical (pendiente constante, acuerdo cóncavo y acuerdo convexo). El algoritmo procesa los datos brutos (distancia recorrida, pendiente longitudinal, pendiente transversal y azimut) y va generando un registro de datos cada vez que cambia la alineación vertical o la alineación horizontal (Ver figura 2.16). Drakopoulos y Ertan mencionan que, aunque no lo exponen en el artículo, también han resuelto la reconstrucción vertical (Drakopoulos and Örnek, 2000).

Baass y Vouland plantean el reconocimiento de las alineaciones horizontales a partir del reconocimiento de rectas y curvas en los diagramas de variación de azimut y de curvatura. Utilizan datos procedentes de un receptor GPS con corrección diferencial y frecuencia de 1 segundo. Estiman la precisión de estos datos en 25 cm en la medida horizontal y 50 cm en vertical. En planta, establecen un «indicador», I_H , que permite clasificar los puntos como pertenecientes a una recta o a una curva, en base al ratio de variación del azimut γ con la distancia l :

Odometer (km) ^a (1)	Gradient (%) (2)	Transverse slope ^b (%) (3)	Compass reading ^c (deg) (4)
16.576	+01.0	+4.9	338
16.592	+01.1	+4.4	338
16.608	+01.3	+4.3	339
16.624	+01.8	+4.4	340
16.640	+02.2	+5.0	341
16.656	+02.9	+4.6	342
16.672	+03.2	+5.0	343
16.689	+03.7	+4.6	344
16.705	+03.7	+3.8	345
16.721	+03.2	+2.6	346
16.737	+02.8	+2.1	346

^aMilepoint readings have been converted to equivalent metric units.

^bPositive sign indicates right edge of traveled lane at lower elevation than left edge, and vice versa.

^cIn degrees clockwise deviation from magnetic North. Sample data indicate curve to right, in direction of travel.

Fig. 2.16: Ejemplo de datos brutos obtenidos por el vehículo de toma de datos y utilizados como entrada del algoritmo de reconstrucción (Drakopoulos and Örnek, 2000)

$$I_H = \frac{\gamma_{i+1} - \gamma_i}{dl_i} \quad (2.1)$$

El estudio afirma que la sensibilidad del método depende del valor límite que se toma para distinguir entre puntos en recta o en curva. El algoritmo lo desarrollan en *Visual Basic* sobre *Excel*. El algoritmo incluye: filtrado valores del GPS, cálculo de las regresiones por mínimos cuadrados, métodos de convergencia, publicación de resultados, recomposición de alineaciones y evaluación del rendimiento de la recomposición. Para la reconstrucción en planta, en primer lugar extraen las líneas rectas por regresiones de mínimos cuadrados. A continuación encajan arcos de círculo que comiencen y terminen en los puntos extremos de las rectas y sean tangentes a las mismas en esos puntos. Determinan, entre los círculos resultantes, los que más se aproximen a la nube de puntos según una distancia que definen. Utilizan una serie de alineaciones ficticias para calibrar y probar el algoritmo. A continuación hacen ensayos con un par de tramos cortos de carreteras reales. Los valores que da el estudio acerca de la precisión obtenida no parecen cuadrar bien, parecen menores que la propia precisión del GPS, lo que no es posible. El procedimiento no reconstruye las curvas clotoides de transición, solo distingue entre alineaciones rectas y curvas circulares (Baass and Vouland, 2005).

Camacho et al. utilizan también un método basado en la variación del azimut a lo largo del recorrido. Los datos que utilizan provienen de la digitalización manual de fotografías de satélite. Indican que necesitan conocer la sucesión de curvas que aparecen el tramo estudiado y que el procedimiento sólo es utilizable para tramos

recta-curva-recta, no para combinaciones más complejas de alineaciones, como curvas ovoides, u otras (Camacho-Torregrosa et al., 2015).

2.6.2.2. Métodos basados en aproximaciones polinómicas

Hay autores que aproximan los puntos de la traza mediante curvas polinómicas y es sobre esa curva aproximada sobre la que calculan las curvaturas que les permitirán identificar las distintas alineaciones. Castro et al. recorren una carretera de una calzada y dos carriles, una vez en cada sentido. A partir de esas dos trazas calculan los puntos medios, que toman como traza del eje. Utilizan *MatLab* para ajustar curvas *splines* a la traza del eje. Las curvas *splines* no son interpolantes, sino que se hacen aproximaciones con un determinado parámetro de suavizamiento. Los resultados obtenidos se comparan con los procedentes del proyecto de la carretera en estudio (Castro et al., 2006).

Cafiso y Graziano tratan de extraer los parámetros geométricos de las distintas alineaciones a través de las curvaturas de las *splines* que mejor se ajustan al juego de puntos de la vía obtenidos mediante un vehículo dotado de GPS con corrección diferencial. La toma de datos la realizan en una furgoneta especialmente habilitada para ello. Los instrumentos de medida utilizados son: GPS, odómetro, servoclinómetro longitudinal, servoclinómetro transversal y dos cámaras digitales, una para filmación frontal y otra para filmación trasera. Todos los instrumentos envían la señal a un ordenador a través de una tarjeta de adquisición de datos, DAQ. Para la toma de datos GPS se utilizó una estación fija en tierra de apoyo al equipo montado en el vehículo. Se aplicaba corrección diferencial a los datos brutos. El vehículo recorría las vías a 60 Km/h y tomaba una posición GPS cada segundo. Cafiso y Graziano afirman que la precisión obtenida por este procedimiento, en la medida de la posición horizontal del vehículo, es de 2 cm más un factor dependiente de la distancia entre la estación GPS fija y la móvil. Comprobaron que manteniendo la distancia entre ambas estaciones GPS por debajo de los 100 Km obtenían precisiones de unos 10 cm en la medida de la posición horizontal, lo que consideran suficiente para la reconstrucción de las alineaciones. En cuanto a la precisión vertical de las medidas del GPS hablan del entorno de los 50 cm. en altitud.

Para la reconstrucción de la geometría en planta a partir de los datos GPS previamente procesados siguen el siguiente procedimiento. Primero ajustan una sucesión de *splines* cúbicas a los puntos de la traza siguiendo el método de Castro et al. (Castro et al., 2006). Para cada punto de la traza calculan la abscisa lineal s correspondiente a su distancia al origen medida a lo largo de las *splines*. Calculan

también la curvatura de la *spline* en ese punto. Con ello crean un gráfico $(s, 1/\rho)$. Lo primero que hacen es separar los tramos rectos de los tramos curvos, incluyendo estos últimos tanto a las curvas circulares como a las clotoides de transición. Hacen notar que el gráfico de curvaturas obtenido presenta una oscilación en torno al valor cero debido a los errores de medida del GPS y la variación de la trayectoria del vehículo. Aplican al diagrama de curvaturas lo que denominan «*banda de tolerancia*» en torno al eje de abscisas. Seleccionan un valor de radio de curvatura $\pm 1/\rho_0$ y consideran que los puntos cuya curvatura en valor absoluto sea menor que ese valor son puntos de curvatura cero. Con ello clasifican los puntos del diagrama en dos tipos: puntos con curvatura cero y puntos con curvatura distinta de cero. Los puntos consecutivos con curvatura cero forman tramos que se considera que corresponden a alineaciones rectas, y los puntos consecutivos con curvaturas distintas de cero constituyen las alineaciones circulares (Ver figura 2.17).

Fig. 2.17: Filtrado de datos mediante una banda de tolerancia (Cafiso and Graziano, 2008)

En este caso tratan de identificar los tramos ponderando los errores entre la curvatura impuesta y la de las *splines* (Ver figura 2.18). Para obtener el gráfico trapezoidal correspondiente a una sucesión clotoide-curva circular-clotoide, imponen que el área del trapecio sea igual al área bajo la curvatura de las Splines. Esto equivale a imponer que el desarrollo angular de la curva, la integral de la curvatura, sea igual en ambos casos. El método no resuelve algunas combinaciones habituales de alineaciones en planta.

También sugieren los autores un método para la reconstrucción del perfil longitudinal mediante regresión lineal sobre los puntos de la traza, si bien no dan

ninguna explicación de la implementación práctica del método (Cafiso and Graziano, 2008). Garach et al. también utilizan un procedimiento similar al de Cafiso y Graziano (Garach et al., 2014a).

Fig. 2.18: Error entre la curvatura impuesta y la procedente de la aproximación por splines (Cafiso and Graziano, 2008)

Imran y Hassan abordaron también el mismo problema. Utilizan datos GPS procedentes de una estación móvil, sobre el vehículo que recorre la vía, y una estación fija en un punto de coordenadas conocidas aplicando posteriormente una corrección diferencial a los datos. El vehículo recorrió la vía a tres velocidades: 80, 90 y 100 Km/h y una vez en cada sentido, lo que totalizó 6 trazas de la carretera. Los datos se tomaron cada 0.1 segundos.

Realizan un proceso en cuatro pasos: (1) separación de los tramos rectos y los tramos curvos, (2) ajuste de líneas rectas a los tramos rectos, (3) ajuste de curvas circulares y (4) asignar el resto de puntos a las curvas de transición. Para separar los tramos rectos de los curvos calculan el azimut θ_i correspondiente a cada segmento de la traza mediante la expresión:

$$\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}\right) \quad (2.2)$$

Si la diferencia de azimut, $|\theta_i - \theta_{i-1}|$, entre dos segmentos sucesivos es menor que un determinado valor límite δ preestablecido, consideran que los puntos de la traza pertenecen a un tramo recto de la carretera. En caso contrario, los puntos

pertenecen a un tramo curvo.

Una vez divididos los puntos de la traza en tramos considerados rectos y tramos considerados curvos, ajustan ecuaciones de rectas a los tramos rectos mediante regresión lineal por mínimos cuadrados, tomando el coeficiente de correlación R^2 como parámetro de calibración de la calidad del ajuste. Para evitar posibles puntos pertenecientes a las curvas de transición, en cada recta consideran el 75 % de los puntos centrales del tramo, dejando fuera del cálculo los puntos restantes. Para el ajuste de las curvas circulares, seleccionan la parte central de los tramos identificados como curvos, realizando el ajuste al 50 % de los puntos centrales del tramo. Utilizan una regresión no lineal mediante iteraciones múltiples, partiendo de una primera aproximación utilizando tres puntos concretos. Con los puntos sobrantes en rectas y curvas se comprueba si su distancia a la respectiva alineación es mayor o menor que un cierto límite. Si es menor se añade a la alineación. Si es mayor se considera que pertenece a la curva de transición. El método sólo es válido para el tramo *recta-clotoide-curva-clotoide-recta* y no se podría utilizar con otras combinaciones de tramos, como podrían ser las curvas ovoides, donde dos curvas circulares con el mismo sentido de giro y distinto radio se unen mediante una clotoide de transición, o los tramos de curvas en S, similar al anterior pero con sentidos contrarios de giro en las curvas circulares (*Imran and Hassan, 2006*).

También Campbell et al desarrollan un método para reconstruir la geometría de las carreteras de dos carriles a partir de trazas GPS con corrección diferencial. Indican que un estudio realizado en 1996 para determinar la precisión y la consistencia en la medida de los radios y la longitud de las curvas llegó a la conclusión de que los métodos utilizados no permitían obtener datos suficientemente precisos. También menciona un estudio de la *University of North Carolina Highway Safety Research Center* y establece que un criterio de precisión adecuado es el 10 % de error en el radio de curvatura y hasta 165 pies (aprox. 50 m.) en la posición del punto de inicio de la curva (*Campbell et al., 2007*).

2.6.2.3. Métodos basados en el cálculo directo de la curvatura

Otros autores basan la distinción de los distintos tramos en planta a partir de las curvaturas estimadas para los puntos provenientes del GPS. Di Mascio et al. toman en cada punto del track, una base móvil compuesta por un número determinado k de puntos, y realizan la aproximación por mínimos cuadrados de una recta y una circunferencia. Se trata de un problema no lineal. Establecen como índice de calidad de las aproximaciones el error cuadrático cometido en la distancia del punto del track

a la curva aproximada. De esta forma, es posible asignar a cada punto del track la condición de recta o circunferencia en función de cuál sea la mejor aproximación a los puntos de la base móvil en ese punto. Representando estos datos en un gráfico, proceden a un reconocimiento visual de las alineaciones. Proponen un método para distinguir las curvas de transición, si bien reconocen la dificultad de su aplicación práctica. También analizan la relación entre el tamaño de la base móvil utilizada para los cálculos y el máximo desarrollo de curva que puede ser identificado (*Di Mascio et al.*, 2012).

Tong et al. realizan el ajuste de las alineaciones mediante mínimos cuadrados. Presenta la ventaja de poder tratar todo tipo de combinación de alineaciones. En este caso utiliza para el estudio una colección de puntos de una vía digitalizados a partir de fotografías aéreas (*Tong et al.*, 2010).

Pérez Zuriaga explica con detalle el proceso seguido en la toma de datos con GPS para poder luego hacer la «restitución» de la geometría de la vía. Utiliza colecciones de recorridos en ambos sentidos de los tramos en estudio, procedentes de diferentes conductores, para la determinación de lo que denomina *trayectoria media*, y que, a efectos de geometría, identifica con el eje de la vía. Realiza una proyección aproximada de los datos originales de latitud y longitud utilizando valores aproximados del radio de la Tierra en la latitud de España. Este procedimiento de proyección de las coordenadas geográficas no es muy preciso. A partir de una colección de trazas en los dos sentidos de recorrido de la carretera, propone un procedimiento de recorte de colas para que todos los recorridos tengan puntos inicial y final comparables. Calcula la trayectoria media de todas las trazas. Desestima explícitamente la posibilidad de utilizar aproximaciones por splines. Calcula el punto medio de los puntos iniciales de las trazas en cada uno de los sentidos con lo que obtiene el punto medio inicial de cada uno de los carriles. El punto medio de estos dos es el que designa como punto inicial de la «trayectoria media». A partir de él va construyendo los puntos de esta trayectoria media, a intervalos de distancia prefijado, mediante un procedimiento iterativo. A partir de la trayectoria media se calcula el diagrama de curvaturas y el de azimuts. Utiliza el diagrama de azimuts por presentar menor variabilidad dependiendo de los datos de entrada y mejor representación gráfica de la geometría (Ver Fig. 2.19). No explica el procedimiento utilizado para calcular el «azimut bruto» a partir de los datos del GPS, ni el procedimiento mediante el cual establece lo que denomina «azimut neto». A partir de ahí determina la longitud y radio de las curvas, la longitud y azimut de las alineaciones rectas y la longitud y parámetros de las clotoideas. Al final del proceso se dispone de las características geométricas de las alineaciones y del perfil de velocidad de operación correspondiente. Para validar restitución de geometría obtenida la comparan con los datos del proyecto y con otra restitución

obtenida mediante un GPS de 10 Hz de frecuencia (Datos cada 0.1 segundos) (Pérez Zuriaga, 2012).

Fig. 2.19: Azimut bruto vs azimut neto del tramo de la carretera CV-35 [Tuéjar - Titaguas] (Pérez Zuriaga, 2012)

2.6.3 Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal

Así como la reconstrucción de la geometría en planta de la carretera ha sido tratada en numerosos artículos, la reconstrucción del perfil longitudinal ha sido tratada por un número menor de autores.

Al igual que en el caso de la reconstrucción horizontal, el problema consta de tres fases diferenciadas: (1) determinación de los puntos frontera entre alineaciones, (2) determinación de los parámetros geométricos de las distintas alineaciones (rampas, pendientes y acuerdos parabólicos) y (3) valoración de la precisión obtenida. También aquí el dato de partida suele ser una *traza* del eje de la carretera obtenida por alguno de los procedimientos descritos anteriormente.

Las geometrías de las alineaciones en el perfil longitudinal son rectas y parábolas, frente a las rectas, clotoides y circunferencias de la proyección en planta. Esto hace pensar que la reconstrucción del perfil longitudinal habría de ser más sencilla que su correspondiente reconstrucción en planta. Hay dos características que hacen que el problema de la reconstrucción vertical sea distinto:

- La precisión en valor absoluto de la medida de altitud proporcionada por los dispositivos GNSS es menor que la precisión de los datos de la proyección en planta
- La curvatura de las alineaciones del perfil longitudinal es mucho menor que la curvatura de las curvas horizontales. El rango de los valores a calcular es menor. Un metro de error en la estimación de la altitud es proporcionalmente mayor para el cálculo de la pendiente de un tramo que un error de un metro en la posición horizontal para el cálculo del radio de curvatura. Por ejemplo, un tramo con pendiente del 5 % varía su altura 5 metros cada cien metros. Un error de un metro en la medida de altitud supone un error del 20 % en la medida de la pendiente. El radio de la curva en planta en cambio toma valores de varios cientos de metros, por lo que un error de 1 metro corresponde a un error en la medida menor del 1 %.

Baass y Vouland estudian la reconstrucción del trazado en alzado a partir de datos GPS. Utilizan la tasa de variación de la pendiente entre dos puntos consecutivos como parámetro para determinar qué puntos pertenecen a alineaciones rectas, cuya tasa de variación de pendiente será próxima a cero y cuáles pertenecen a acuerdos parabólicos, cuya tasa de variación de pendiente es constante. Si se denomina g_i a la pendiente en el punto i de la traza del eje, g_{i+1} a la pendiente del punto $i + 1$ y dl_i a la longitud del segmento de traza entre los puntos i y $i + 1$, la expresión que utilizan para medir la tasa de variación de la pendiente entre dos puntos es:

$$I_{Vertical} = \frac{g_{i+1} - g_i}{dl_i} \quad (2.3)$$

Establecen un valor límite de la tasa de variación de pendiente por debajo del cual consideran el tramo como rectilíneo. Si la tasa de variación de pendiente entre dos puntos es mayor que el valor límite adoptado, el tramo se considera parabólico. Con este criterio dividen los puntos de la traza en puntos que corresponden a una alineación de pendiente constante y puntos que pertenecen a un acuerdo parabólico.

Primero determinan las ecuaciones de los tramos considerados como alineaciones rectilíneas de pendiente constante mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados de los puntos del tramo considerado.

Para calcular los tramos parabólicos comprendidos entre cada dos tramos rectos, consideran como datos de partida: (1) la pendiente de entrada al acuerdo, (2) la pendiente de salida del acuerdo, (3) el PVI, (*Point of Vertical Intersection*), correspondiente al punto de intersección de la tangente de entrada y salida, y (4)

las coordenadas GNSS de los puntos de la traza en ese tramo. Consideran, además, que la parábola es simétrica respecto del punto medio.

Realizan un ajuste por mínimos cuadrados de las alineaciones determinadas como rectas y a partir de ellas calculan las parábolas que mejor aproximan por mínimos cuadrados los puntos GPS, imponiendo que las tangentes de entrada y salida sean las de las rectas adyacentes al tramo parabólico. Lo resuelven por iteraciones, partiendo de un determinado valor para el parámetro o la longitud del acuerdo y dejando variar la posición de los puntos de entrada y salida. Prueban el procedimiento con datos de un trazado teórico, y a continuación con datos GPS reales correspondientes a tramos de carreteras de Quebec.

Para medir la precisión del método de reconstrucción, calcularon la distancia vertical entre los puntos GNSS y los puntos resultantes de las alineaciones reconstruidas. Indican en su estudio que el error medio en el que incurría el procedimiento fue de 15 cm y el error máximo de 1.5 m. Admiten en su estudio que aplicaron un filtro a los datos originales procedentes del GNSS para limitar las irregularidades, pero no detallan en qué consistió dicho filtro. Tampoco explican cómo realizaron la división en tramos, por lo que es probable que ésta se llevara a cabo designando explícitamente dicha división entre unos tramos y otros mediante una inspección visual de los gráficos de los perfiles (*Baass and Voulard, 2005*).

Easa y Kikuchi consideran tres tipos de acuerdos parabólicos: (1) el acuerdo compuesto por una parábola que enlaza dos tramos de pendiente constante, (2) el acuerdo asimétrico formado por dos parábolas con diferentes parámetros K_v y diferentes longitudes y (3) el acuerdo formado por dos parábolas de diferente K_v pero con la misma longitud. El método de reconstrucción del perfil longitudinal que proponen necesita asignar un valor inicial a las coordenadas de algunos puntos significativos: los puntos de inicio y final del acuerdo parabólico, el vértice del acuerdo, esto es, el punto de intersección de los tramos de pendiente uniforme a la entrada y salida del acuerdo y las coordenadas de uno de los puntos que se sepa con seguridad que pertenece al tramo de pendiente constante anterior al acuerdo. Establecen unos límites mínimos y máximos para los posibles valores de los parámetros de las alineaciones. Resuelven el problema como un problema de optimización en el que el objetivo es minimizar la suma del cuadrado de las diferencias entre las cotas de los puntos de la muestra y las cotas resultantes de las expresiones matemáticas de las alineaciones reconstruidas. Una vez que tienen definidos el objetivo y las restricciones del problema de optimización, utilizan el software «*Premium solver*» para resolverlo. El software necesita también incorporar un valor aproximado de la solución de los parámetros que pretende calcular (*Easa and Kikuchi, 2009*).

Fig. 2.20: Geometría de los acuerdos asimétricos considerados en el trabajo de Easa y Kikuchi (TA = traditional asymmetrical, EAA = equal-arc asymmetrical. (Easa and Kikuchi, 2009))

En un trabajo posterior, Easa y Wang (2010) presentaron un modelo de optimización para perfiles longitudinales compuestos de más de un acuerdo vertical, utilizando aproximaciones por mínimos cuadrados. El modelo que proponen se desarrolla en dos niveles: optimización de la aproximación a cada acuerdo individual y optimización de la aproximación al perfil completo. El primer nivel se utiliza para obtener la longitud aproximada de cada acuerdo parabólico a partir de determinados puntos de control en los tramos de pendiente constante anteriores y posteriores a los acuerdos. El segundo nivel se aplica para obtener los parámetros que optimizan el problema tanto para los tramos de pendiente constante como para los acuerdos parabólicos. El modelo lo validaron utilizando datos de un tramo de carretera de 1700 metros de longitud. Mideron la precisión del procedimiento de reconstrucción de la geometría comparando las altitudes reales de los puntos del tramo con las obtenidas de las expresiones analíticas calculadas y afirman haber obtenido un error medio 0.038 metros. Como futuras líneas de investigación proponen algún procedimiento automático que pueda determinar los puntos límite entre alineaciones y las expresiones analíticas de las mismas (Easa and Wang, 2010).

Di Mascio et al. (2012) utilizan datos procedentes de un dispositivo GNSS montado en un vehículo que recorre la carretera. Utilizan un método de optimización basado en aproximaciones por mínimos cuadrados de bases móviles creadas a partir de los puntos de la traza GNSS. Los acuerdos los interpretan como acuerdos circulares, no como acuerdos parabólicos. Al final, utilizan el diagrama de curvatura vertical para afinar los resultados obtenidos del algoritmo (*Di Mascio et al.*, 2012).

Cafiso y Graziano (2008), en su artículo acerca de la reconstrucción de la geometría del trazado en planta, mencionan acerca de la reconstrucción del perfil longitudinal la necesidad de obtener datos de altitud suficientemente precisos. Sugieren utilizar un clinómetro para obtener los datos de la pendiente de la carretera (*Cafiso and Graziano*, 2008).

Los programas comerciales ofrecen herramientas gráficas de ayuda a la reconstrucción del perfil longitudinal basadas en la interacción del usuario con el diagrama de pendientes o el perfil longitudinal (*Bentley*, 2014; *Puy*, 2016). Pero no se ha encontrado ninguna publicación que explique una herramienta que permita la reconstrucción del perfil longitudinal de manera automática.

2.7 CONCLUSIONES

Hasta aquí se ha resumido la situación actual de la técnica de realización de inventarios de carreteras en lo que se refiere a: (1) los inventarios fílmicos, (2) las aplicaciones existentes para dispositivos móviles que explotan la utilización de los distintos sensores, (3) los sistemas de referencia utilizados habitualmente en los inventarios de carreteras, (4) los modelos estándares de datos y los formatos de almacenamiento utilizados para los mismos y (5) los distintos procedimientos ensayados para la reconstrucción de la geometría de las carreteras ya construidas.

Como conclusiones se pueden indicar las siguientes:

- Los inventarios fílmicos son una herramienta de gran utilidad para la confección y el mantenimiento de los inventarios de carreteras de cualquier tipo. Los equipos actuales de las casas comerciales basados en vehículos *MMS* y las técnicas más modernas de identificación automática de imágenes pueden ser de gran utilidad en la confección de inventarios en carreteras en el entorno de los países desarrollados, pero tienen un alto coste y pueden no adaptarse bien a otro tipo de vías o de usuarios. Los métodos basados en herramientas de bajo coste podrían prestar buenos servicios a todo tipo de vías y de usuarios.

- No existe un estándar para georreferenciar los vídeos fotograma a fotograma.
- Los *smartphones*, debido a los sensores de que disponen y a su potencia de cálculo actual, pueden ser una herramienta a considerar para el desarrollo de aplicaciones destinadas al mantenimiento y explotación de la red viaria.
- Si bien se han encontrado aplicaciones para dispositivos móviles que permiten la explotación parcial de inventarios ya existentes, no se ha encontrado, durante la realización de este estudio, ninguna aplicación específica basada en *smartphones*, que permita registrar el vídeo, el sonido, el GPS, el acelerómetro y el barómetro y con ello poder servir como herramienta de bajo coste para la confección de inventarios de vías.
- Los sistemas de referencia lineal y la técnica de segmentación dinámica proporcionan una herramienta fundamental para la localización de los elementos y valor de las propiedades de los mismos en los inventarios de carreteras, pero dada la facilidad a día de hoy de disponer de coordenadas absolutas referidas a sistemas de referencia geodésicos, es buena práctica incorporar en los inventarios los dos métodos de referenciación. En cualquier caso, es necesario que los inventarios identifiquen adecuadamente los sistemas de referencia lineales y geodésicos que utilizan en las coordenadas que proporcionan de los distintos elementos de las vías.
- La reconstrucción de la geometría del eje de la carretera tiene aún un amplio campo de investigación abierto en el desarrollo de herramientas efectivas para la caracterización geométrica de las alineaciones, tanto de la geometría en planta como de la geometría del perfil longitudinal. Los sistemas de cálculo de los radios de curvatura basados en sensores situados sobre vehículos MMS tienen errores significativos.

3. INVENTARIO FÍLMICO

3.1 INTRODUCCIÓN

La filmación del recorrido de una carretera proporciona, por sí misma, un elemento de gran utilidad para los trabajos de conservación e inventariado. Es posible visualizar en los vídeos los hitos kilométricos u otros elementos singulares, y utilizar dicha información para posicionar elementos o subdividir en tramos que requieran diferentes tipos de actuación. No obstante, para obtener el máximo provecho de dichas filmaciones, es necesario georreferenciar los vídeos, de manera que se puedan asociar con precisión los fotogramas de la filmación con su localización absoluta sobre el terreno. Los teléfonos móviles de última generación disponen de cámaras de vídeo y fotografía que permiten su aplicación práctica a esas tareas de inventariado. También existen cámaras de vídeo de pequeñas dimensiones que permiten su instalación, mediante los soportes adecuados, en cualquier tipo de vehículo y, con ello, su utilización en las tareas de inventariado.

En este capítulo se presentan los algoritmos que se han desarrollado para sincronizar una filmación de vídeo con la correspondiente traza del recorrido registrada con un dispositivo GNSS. Estos algoritmos han dado lugar a algunas aplicaciones informáticas pensadas para ejecutarse en teléfonos móviles o en ordenadores personales y que proporcionan opciones de bajo coste adaptables como herramientas de ayuda en la realización de los inventarios de cualquier tipo de carretera o camino. También se han desarrollado algoritmos que permiten sincronizar la traza GNSS y los valores aportados por los diferentes sensores incorporados en los teléfonos móviles con sistema operativo *Android*, lo que abre el camino a la investigación del aprovechamiento de estos sensores en la realización de los inventarios de las vías.

El capítulo consta de seis apartados. El apartado segundo se dedica a explicar el desarrollo del algoritmo de sincronización. En el apartado tercero se detalla el formato de datos desarrollado para almacenar la información de la traza GNSS y los datos de sincronización, así como la librería de procedimientos GpxParser desarrollada al efecto. El apartado cuarto muestra las dos aplicaciones principales que se han desarrollado: RoadPlayer y RoadRecorder. El quinto apartado muestra los resultados de los ensayos realizados. Por último, el apartado sexto se dedica a establecer las conclusiones extraídas de los resultados de dichos ensayos.

Las aplicaciones se han probado en la realización de tareas básicas de

inventariado de las carreteras M-513, M-633, M608, M607 de la provincia de Madrid, y en el camino forestal de acceso al Cerro Mediana, en el municipio de Moralarzal (provincia de Madrid). En cada uno de los casos se han realizado diversos ensayos para probar la validez del procedimiento propuesto en tareas propias del inventariado de vías.

3.2 SINCRONIZACIÓN DE VÍDEO Y GNSS

Las distintas localizaciones del vehículo que recorre la vía durante la filmación se registran mediante dispositivos GNSS que proporcionan las coordenadas geográficas del vehículo a intervalos de tiempo regulares. El problema que se resuelve en este apartado es el de la sincronización entre los datos de posición aportados por el dispositivo GNSS y los fotogramas de la filmación de vídeo correspondiente.

En realidad hay dos sincronizaciones distintas, que se han denominado *sincronización directa* y *sincronización inversa*:

- **Sincronización directa:** consiste en calcular la posición del vehículo que corresponde a un fotograma concreto de la filmación
- **Sincronización inversa:** es la operación inversa de la anterior. En este caso se trata de identificar qué fotograma corresponde a una determinada posición sobre la trayectoria registrada del vehículo encargado de la filmación

Los datos de partida son la filmación de vídeo, realizada con el teléfono móvil o con una cámara de vídeo, y la traza GNSS del recorrido registrada con el teléfono móvil o con un receptor GNSS independiente.

La traza del vehículo registrada por los dispositivos GNSS consiste en una colección de puntos, a intervalos de tiempo sensiblemente regulares, de los que se conocen sus coordenadas geográficas (*longitud*, *latitud*, *altitud*), y el instante de tiempo. La geometría resultante es una polilínea formada por segmentos rectilíneos que unen cada dos puntos consecutivos.

El intervalo de tiempo entre dos posiciones sucesivas depende de la frecuencia de muestreo del dispositivo, siendo habituales frecuencias de un segundo, en los receptores de los teléfonos móviles, y una décima de segundo en los receptores profesionales de alta gama. De esta forma, un vehículo que recorra la vía a 80 Km/h, registrará posiciones cada 22 *m* aproximadamente, en el caso de un teléfono móvil, y cada 2.2 *m* en el caso de los receptores profesionales de alta gama.

El instante de tiempo que acompaña a cada posición registrada es la hora UTC

(*Universal Time Coordinated*). Los dispositivos GNSS proporcionan una hora UTC que se corresponde con la que reciben de la señal portadora de los satélites. Cuando se trabaja con computadoras, los tiempos se operan en forma de un número entero que corresponde a los milisegundos transcurridos desde las cero horas UTC del día 1 de enero de 1970. Según el receptor GNSS que se utilice se dispondrá, para cada posición, de la hora UTC en formato horas, minutos y segundos, del dato en milisegundos transcurridos desde el 1 de enero de 1970 o de ambos datos. Mediante operaciones aritméticas se puede pasar de la hora UTC expresada como horas, minutos y segundos, a la hora UTC correspondiente expresada en milisegundos transcurridos desde el 1 de enero de 1970 y viceversa.

En cuanto a las coordenadas, según el dispositivo concreto, las coordenadas pueden venir expresadas en diferentes sistemas de referencia. En particular, los dispositivos GPS, que siguen siendo los más habituales, proporcionan las coordenadas geográficas referidas al sistema de referencia WGS84 (*National Imagery Mapping Agency*, 2000). Algunos dispositivos realizan una transformación de estas coordenadas y pueden proporcionar también coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) u otras.

Hay que tener en cuenta que el sistema de referencia WGS84 proporciona coordenadas (*longitud, latitud, altitud*) referidas a un sistema de referencia elipsoidal. Los cálculos de distancias utilizando directamente dichas coordenadas son complejos. Se suelen proyectar en un sistema de referencia plano que proporcione coordenadas (x, y, z) de los puntos, por ejemplo el sistema UTM, de forma que se puedan calcular los ángulos y las distancias entre puntos mediante las fórmulas habituales de la geometría cartesiana. El cálculo de distancias sobre el sistema proyectado no tendría la suficiente precisión si se tratara de grandes distancias, superiores a cien kilómetros, por ejemplo, pero es suficientemente preciso en las distancias que se utilizan en este estudio, que no pasan de unos cuantos metros. En el caso de grandes distancias habría que utilizar fórmulas de distancia ortodrómica, que consiste en la medición de las distancias a lo largo de círculos máximos sobre el elipsoide de referencia (*Mederos*, 2007).

Las grabaciones de vídeo están compuestas por fotogramas individuales que se almacenan consecutivamente en algún formato informático que permite su reproducción posterior. Cada filmación lleva asociados una serie de metadatos, entre los que se encuentra la hora en que comenzó la grabación, el ratio de fotogramas por segundo con que se realizó dicha grabación, fps , la resolución en píxeles de los fotogramas individuales y el número de orden que ocupa cada fotograma dentro de la filmación.

Conocido el número de orden que ocupa un fotograma dentro de la filmación, n ,

y el ratio de fotogramas por segundo, fps , se puede calcular el tiempo transcurrido, Δt , desde el inicio de la grabación hasta el fotograma n :

$$\Delta t = \frac{n}{fps} \quad (3.1)$$

Para poder asociar un instante de tiempo absoluto UTC a cada fotograma, se necesita conocer el instante de tiempo UTC que corresponde al primer fotograma de la filmación, que se denominará t_0 . Si se conoce el instante inicial de la grabación, t_0 , y el ratio de fotogramas por segundo, fps , se puede calcular el instante t que corresponde al fotograma de número de orden n de la filmación mediante la siguiente expresión:

$$t = t_0 + \Delta t = t_0 + \frac{n}{fps} \quad (3.2)$$

Por otra parte, la traza del recorrido se conoce en forma de una serie de posiciones $P_1, P_2, \dots, P_k$, para cada una de las cuales se conoce la hora UTC y las coordenadas latitud, longitud y altitud en el sistema de referencia WGS84.

3.2.1 Sincronización directa

En el problema de sincronización directa, esto es, cuando se quieren calcular las coordenadas de la posición que corresponde a un determinado fotograma de número de orden n dentro de la filmación, el primer paso es calcular, según 3.2, la hora UTC que corresponde a dicho fotograma. Como se ha indicado, para poder realizar este cálculo, se necesita conocer la hora UTC del primer fotograma, t_0 , y el ratio de fotogramas por segundo de la filmación, fps . Conocida la hora UTC del fotograma, que se denominará t , se trata de buscar en la traza del recorrido las coordenadas que se corresponden con dicho instante t .

En general, el instante t del fotograma no se corresponderá con ninguno de los instantes correspondientes a las posiciones registradas en la traza, sino que dicho instante t estará comprendido entre los instantes correspondientes a dos posiciones consecutivas en la traza. Sean estas posiciones P_i y P_{i+1} y sus horarios UTC t_i y t_{i+1} . Las coordenadas que corresponden al fotograma n , se pueden calcular realizando una interpolación lineal para el tiempo t entre las coordenadas de la posición P_i y las de la posición P_{i+1} . Para poder realizar cálculos de distancias e interpolaciones es necesario trabajar con coordenadas proyectadas en un sistema de referencia cartesiano de ejes X, Y, Z , con lo que las coordenadas de los puntos P_i y P_{i+1} serán (x_i, y_i, z_i) y $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$. Dado que se trata de

instantes de tiempo muy próximos, se puede considerar que la variación en las coordenadas (x, y, z) es proporcional al tiempo transcurrido, por lo que las coordenadas cartesianas correspondientes a un instante t tal que $t_i < t < t_{i+1}$, se pueden aproximar mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}x &= x_i + (t - t_i) \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} \\y &= y_i + (t - t_i) \frac{y_{i+1} - y_i}{t_{i+1} - t_i} \\z &= z_i + (t - t_i) \frac{z_{i+1} - z_i}{t_{i+1} - t_i}\end{aligned} \tag{3.3}$$

Una vez calculadas las coordenadas cartesianas (x, y, z) correspondientes al instante t , se puede realizar la transformación del sistema de referencia para obtener las coordenadas geográficas latitud, longitud y altitud del punto. De esta forma, queda resuelto el problema de la sincronización directa.

3.2.2 Sincronización inversa

En la sincronización inversa, se parte de una posición de la trayectoria de la que se conocen sus coordenadas y que estará comprendida entre dos posiciones P_i y P_{i+1} de la traza registrada. Hay que calcular el instante de tiempo que corresponde a dichas coordenadas. Para ello se puede proceder de manera similar al caso directo, calculando el instante t mediante la interpolación de los instantes t_i y t_{i+1} correspondientes a los puntos de la traza inmediatamente anterior y posterior. Una vez más, será necesario hacer los cálculos de distancias sobre coordenadas (x, y, z) proyectadas de los puntos. Una vez obtenido el instante t que corresponde a dicha posición, se tratará de buscar en la filmación el fotograma cuyo instante de tiempo sea el más próximo al buscado. El número de orden n del fotograma que se corresponde con un instante t se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$n = t \times fps \tag{3.4}$$

Se tomará la parte entera del resultado obtenido en 3.4, de manera que se obtenga el fotograma cuyo instante de tiempo es inmediatamente anterior al buscado, para no sobrepasar nunca la posición del móvil.

En la práctica, el problema es un poco más complejo. Lo habitual es que el usuario elija la posición de la que quiere obtener el fotograma *pinchando* con el ratón del ordenador en pantalla, donde está dibujada la traza del recorrido sobre un

mapa base. En general, el usuario no pinchará exactamente en un punto de la traza, sino en un punto próximo, por lo que en primer lugar, es necesario calcular cuál es la posición más cercana, dentro de la traza, al punto donde ha pinchado el usuario. La traza tiene una geometría de polilínea. El cálculo del punto más próximo a uno dado en una polilínea se realiza mediante algoritmos de análisis espacial, habituales en entornos SIG.

En la figura 3.1 se describe esta circunstancia. Se parte del «*punto seleccionado*» por el usuario. El punto seleccionado por el usuario proporciona sus coordenadas en el sistema de referencia del mapa base que hay en ese momento en pantalla. El programa *RoadPlayer* desarrollado calcula las coordenadas UTM del punto en el sistema ETRS89, que es el que se utiliza para todos los cálculos de ángulos y distancias. Esta transformación normalmente necesita pasar primero por el sistema WGS84, esto es, las coordenadas del punto seleccionado se transforman desde el sistema de referencia del mapa al sistema WGS84 y, desde ahí, se proyectan en coordenadas UTM del sistema de referencia ETRS89. A continuación, hay que calcular el «*punto más próximo*», dentro de la traza del recorrido e identificar las posiciones anterior y posterior a ese punto, dentro de la traza. Finalmente, el programa, calcula de nuevo las coordenadas del punto de la traza en coordenadas del mapa base, para poder actualizar la posición del móvil.

De hecho, hay más cambios de sistemas de referencia implicados cada vez que el usuario «*pincha*» en pantalla. El ordenador lo que proporciona son las coordenadas «*pixel*» en la pantalla del punto sobre el que estaba el ratón en el momento de pinchar. El programa mantiene una transformación afín entre las coordenadas «*pixel*» de pantalla y las del sistema de referencia del mapa base. Cada vez que se carga un mapa en pantalla o se hace zoom o desplazamiento, el programa actualiza la transformación afín. De esta forma, al seleccionar un punto de la pantalla, la primera transformación consiste en calcular qué coordenadas del mapa base le corresponden en esa escala de visualización. A partir de ahí, se hacen el resto de transformaciones entre sistemas de referencia geodésicos. En el proceso inverso sucede lo mismo: calculadas unas coordenadas geográficas que se quieren representar en pantalla sobre el mapa base, hay que aplicar la transformación afín vigente para situar el punto en pantalla. Todo este proceso es percibido como instantáneo por el usuario.

Se pueden interpretar las dos sincronizaciones comentadas como unas transformaciones entre el dominio del tiempo y el dominio del espacio. La identificación de los fotogramas en los vídeos se realiza en el dominio del tiempo, mientras que la identificación de las posiciones en la traza se realizan en el dominio del espacio. Con esta interpretación, la sincronización directa consiste en

Fig. 3.1: Problema inicial de la sincronización inversa: selección del punto más próximo dentro de la trayectoria del móvil a un punto dado

pasar del dominio del tiempo al del espacio, mientras que la sincronización inversa consiste en pasar del dominio del espacio al dominio del tiempo.

3.2.3 Sincronización de relojes

Hay que destacar que las horas UTC proporcionadas por el dispositivo GNSS y por la cámara, en general, no coincidirán, ni siquiera en el caso de estar utilizando un mismo dispositivo dotado de cámara y receptor GNSS, como puede ser un teléfono móvil o una *action-cam* dotada de GPS. Resulta que el tiempo que graban los receptores GNSS es el que reciben de la señal portadora procedente de los satélites, mientras que el tiempo que se añade como metadatos a las filmaciones de vídeo procede del reloj interno del dispositivo, y dichos tiempos no suelen estar sincronizados. Es importante, por tanto, antes de comenzar la grabación de vídeo, comprobar que el reloj interno de la grabadora de vídeo y el reloj que proporciona los tiempos en el receptor GNSS están sincronizados o, en su defecto, anotar la diferencia de tiempo entre ambos, para poder proceder con posterioridad a su sincronización. Como se ha indicado, una diferencia de tiempo entre ambos datos de un segundo dará origen a un descuadre superior a veinte metros en un vehículo que recorra la vía a 80 km/h.

Para soslayar el problema, el software *RoadRecorder* desarrollado (apartado 3.4.1) lo que hace es dar prioridad al reloj del GPS. Cuando comienza la grabación

de vídeo y GPS, el sistema añade al vídeo el metadato de la hora de comienzo de la grabación, según el reloj del dispositivo. Lo que hace *RoadRecorder* es sustituir dicha hora por la que da el GPS en ese momento, reescribiendo el metadato del archivo de vídeo.

3.3 EL FORMATO DE DATOS Y LA LIBRERÍA GPXPARSER

En el capítulo 2 se han indicado los formatos que se utilizan para almacenar la información procedente de las filmaciones de vídeo o de la toma de fotografías. Los programas destinados a la reproducción de dichas filmaciones identifican los fotogramas concretos mediante la medida del tiempo transcurrido desde el inicio de la filmación o bien mediante un número entero que se corresponde con el número de orden del fotograma. En ambos casos, la identificación de fotogramas se realiza en el dominio del tiempo.

Uno de los problemas que se presentan a la hora de querer registrar de manera sincronizada los vídeos grabados por un teléfono móvil junto con los datos procedentes de diferentes sensores consiste en seleccionar un formato que permita dicha grabación de forma que posteriormente se puedan decodificar y reproducir de manera correcta. El problema radica en que cada uno de los sensores, incluida la cámara de vídeo, graban datos con distinta cadencia. Así, por ejemplo, la cámara puede estar grabando 60 fotogramas por segundo (*fps*), el GPS leyendo una posición por segundo y cada uno de los sensores registrando datos con la frecuencia correspondiente a su dispositivo, que, en general, no coincidirá con ninguna de las anteriores.

Como ya se ha referido en el capítulo 2, el formato estándar GPX (*Foster*, 2004) es un formato habitual de grabación utilizado por los receptores GNSS. GPX utiliza el estándar XML para el almacenamiento de la información, lo que aporta la ventaja adicional de ser utilizable por los computadores y a la vez ser humanamente legible, esto es, leyendo el código almacenado es fácil acceder a la información o modificarla con un simple editor de textos (*World Wide Web Consortium*, 2013). El formato GPX prevé las denominadas *extensiones* del lenguaje, que permiten añadir información adicional a cada uno de los puntos o trazas almacenados. Esta característica del lenguaje GPX se ha utilizado en este trabajo de investigación para diseñar una extensión del lenguaje, que se ha denominado «*GpxParser*». *GpxParser* permite añadir, a cada punto o traza registrados, los datos correspondientes a los diferentes sensores cuyos valores se quieran registrar. La extensión del formato GPX desarrollada es la que utilizan los programas desarrollados en esta tesis para almacenar y transmitir la información

correspondiente a las trazas de los recorridos y los valores de los distintos sensores. La gestión y el procesamiento de la información almacenada en dicho formato de datos, se realiza mediante los procedimientos proporcionados por la librería *GpxParser*, del mismo nombre que la extensión del formato de datos.

Para proceder a la sincronización de los distintos sensores se han desarrollado una serie de algoritmos que se han reunido en la librería *GpxParser*, del mismo nombre que el formato de datos. El código de esta librería de procedimientos está desarrollado en lenguaje JAVA y es utilizable, tanto desde los sistemas operativos para ordenadores de escritorio, como desde los dispositivos con sistema operativo Android. Los programas *RoadRecorder* y *RoadPlayer* utilizan la librería de procedimientos *GpxParser* y la extensión del formato de datos para su funcionamiento. El código de la librería *GpxParser* se encuentra disponible como software libre bajo licencia Creative Commons Compartir Igual 3.0 (*Creative Commons*, 2017) en el repositorio Github del autor (*Higuera de Frutos*, 2015a).

Los programas desarrollados durante esta investigación utilizan el paradigma de la programación orientada a objetos. En la programación orientada a objetos, se denomina *clase* a un conjunto de variables y rutinas que operan de manera conjunta y son los encargados de determinada tarea concreta dentro del programa general. Serían el equivalente de los subprogramas en el paradigma clásico de la programación estructurada.

La librería *GpxParser* proporciona diferentes clases para el almacenamiento de los puntos y las trazas procedentes del receptor GNSS. Cada vez que se graba una posición procedente del GPS, se añaden a dicha posición los valores de todos los sensores. La obtención del valor correcto de cada sensor que se corresponde con el instante de la posición GPS utiliza los algoritmos de sincronización desarrollados al efecto y que son manejados por una clase denominada «*TSerie*». La clase *TSerie* es la encargada de la sincronización entre los vídeos y las trazas de los recorridos. Cada objeto de la clase *TSerie* mantiene un vector, con los tiempos correspondientes a cada posición de una traza y una matriz con tantas filas como tiempos tenga el vector de los tiempos, y las columnas necesarias para guardar las coordenadas de los puntos y los valores de los sensores.

Con el fin de aumentar la velocidad de acceso a los valores, el vector de tiempos utiliza números enteros para cada valor de tiempo. Dicho número entero corresponde a los milisegundos transcurridos desde las cero horas UTC del 1 de enero de 1970 hasta el instante en cuestión. A cada instante de tiempo t del vector de tiempos, le corresponde un vector de valores en coma flotante con los datos de las coordenadas y los valores de los sensores. Así, para la posición P_i , la clase *TSerie* guarda el tiempo t_i y un vector con los valores de las coordenadas y los

datos de los sensores:

$$(\lambda_i, \varphi_i, h_i, x_i, y_i, z_i, a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}, p_i, \dots) \quad (3.5)$$

Las coordenadas de cada punto se almacenan en columnas de la matriz, tanto en sus valores de coordenadas geográficas $(\lambda_i, \varphi_i, h_i)$ como en sus valores proyectados (x_i, y_i, z_i) . Se utiliza la proyección UTM de la zona geográfica correspondiente a los valores de latitud y longitud de la traza. La altitud no se proyecta, y se utiliza siempre la correspondiente al sistema de referencia WGS84.

La clase *TSerie* tiene un método denominado *getValues()* que recibe como parámetro un número entero, que representa un instante t , y devuelve un vector de números en coma flotante con las coordenadas y el valor de los sensores que se corresponden con ese instante. En la figura 3.2 se muestra el esquema UML (*Unified Modeling Language*) de la clase *TSerie* con indicación del método *getValues()*. Si el instante t , del que se solicitan valores, no coincide exactamente con ninguno de los almacenados en el vector de tiempos, las coordenadas y los valores de los sensores que devuelve el método *getValues()* se obtienen mediante interpolación lineal entre los valores correspondientes al instante inmediatamente anterior y el instante inmediatamente posterior al instante t solicitado. Utilizando el método *getValues()* de la clase *TSerie* se pueden obtener las coordenadas correspondientes al punto desde el que se tomó el fotograma, así como los valores de los sensores asociados con dicha localización. La llamada en JAVA será la siguiente:

```
double[] values = trackObject.getValues(t);
```

De esta manera, la variable *values* es un vector que contiene las coordenadas y los valores de los sensores correspondientes al instante t .

La librería *GpxParser* dispone de procedimientos que implementan los algoritmos correspondientes a la proyección de las coordenadas geográficas latitud, longitud desde el sistema de referencia WGS84 al sistema de referencia proyectado UTM (*Universal Transverse Mercator*). Los algoritmos identifican en primer lugar la zona geográfica correspondiente a la latitud y longitud para proyectar al sistema UTM correspondiente. *GpxParser* implementa también la proyección inversa de forma que es posible obtener las coordenadas geográficas de un punto a partir de las coordenadas UTM del mismo. Los algoritmos desarrollados siguen las ecuaciones de *Cotticchia-Surace*, según el procedimiento descrito por Gabriel Ortiz (Ortiz, 2004). El código JAVA se puede consultar en el repositorio de código mencionado anteriormente (Higuera de Frutos, 2015a).

TSerie

Fig. 3.2: Esquema de la clase *TSerie* encargada de gestionar las posiciones asociadas a los tiempos dentro de un track

Para el cálculo del punto más próximo dentro de la polilínea de la traza del móvil a un punto seleccionado por el usuario se utilizan los algoritmos de análisis espacial proporcionados por la librería Geotools (*Open Source Geospatial Foundation*, 2002).

Sincronización directa

Sincronización inversa

Fig. 3.3: Esquema de los interfaces necesarios para la sincronización directa y la sincronización inversa

El esquema de los diferentes interfaces implementados para las transformaciones necesarias en la sincronización, entre el dominio del tiempo de los vídeos y el dominio del espacio de las trazas, se puede ver en la figura 3.3. En la parte superior de la figura 3.3 se describe la sincronización directa. En primer lugar el objeto «*Video*» obtiene un valor entero con el instante t que corresponde a un fotograma. A continuación, el objeto «*Track*» utiliza dicho valor de t y, mediante

el método `getPointAtTime(t)` proporciona las coordenadas de un punto. Utilizando las coordenadas del punto devueltas por el objeto *Track*, el objeto «*Map*» utiliza su método `setMobilePosition(Point)` para situar el icono del móvil en el mapa de pantalla, en la posición correspondiente al punto. En la parte inferior de la figura 3.3, se detalla la sincronización inversa. En este caso la secuencia comienza con el objeto «*Map*» que utiliza su método `getPointFromUser()` para obtener las coordenadas donde ha *pinchado* el usuario con el ratón. Dichas coordenadas se pasan al objeto «*Track*» que utiliza su método `getNearestPoint(Point)` para obtener el punto de la traza más próximo al seleccionado por el usuario. A continuación el propio objeto *Track* utiliza su método `getTimeForPoint(Point)` para obtener el instante t que les correspondería, interpolando entre los puntos de la traza. Dicho instante t se le pasa al objeto «*Video*» para que, utilizando su método `setTime(t)` posicione la reproducción del vídeo en dicho instante. En la figura 3.4 se pueden ver la pantalla del programa *RoadPlayer*, con indicación de los controles implicados en los procesos de sincronización del vídeo y la traza. En este caso, el programa sincroniza la posición del móvil, tanto en planta como en el perfil longitudinal.

Fig. 3.4: Controles del programa *RoadPlayer* implicados en la sincronización directa e inversa

La librería *GpxParser* también proporciona algoritmos que permiten la exportación de los datos contenidos en los ficheros GPX generados al formato

estándar KML (*Google*, 2015), lo que permite, entre otras cosas, la visualización de los tracks y de los puntos en el conocido software *Google Earth* de Google. GpxParser también proporciona mecanismos para la exportación de los tracks, con toda la información adicional de los sensores, al formato CSV (Comma Separated Values), lo que posibilita la utilización de la información desde hojas de cálculo.

Como se ha comentado, la extensión del formato GPX creada para registrar las trazas de los recorridos permite añadir a cada punto los valores de diferentes sensores.

El problema a resolver es establecer los valores de cada sensor que se corresponden con el instante concreto en el que el GPS proporciona posiciones, pues en general, la cadencia de los sensores no coincidirá con la del receptor GNSS. Así, lo habitual, es que los sensores tengan una cadencia de valores mucho más rápida que la del receptor GNSS. Una frecuencia habitual de los receptores GNSS de los teléfonos móviles es de una posición por segundo, mientras que el acelerómetro, el clinómetro o el barómetro proporcionan varias posiciones por segundo. Como ejemplo, indicar que las pruebas realizadas sobre el teléfono móvil del autor, un *Nexus 5* con el sistema operativo *Android* versión 6.0.1, arrojaron una frecuencia del acelerómetro de 198 Hz .

El procedimiento que utiliza la clase *TSerie* para la sincronización de los datos de cada sensor con los del GPS es ir almacenando toda la información que va generando cada sensor entre cada dos posiciones sucesivas del GPS. Cada vez que el GPS proporciona una nueva posición, *TSerie* evalúa los datos de cada sensor que se han ido recibiendo y registrando desde la última posición GPS, calculando un valor agregado de dichos datos. Dicho valor agregado se puede configurar para que tome la media de todos los valores leídos durante el intervalo de tiempo entre dos posiciones GPS, o cualquier otro valor agregado (máximo, mínimo, mediana u otros). Ese valor agregado calculado para cada sensor es el que se almacenará en el fichero GPX, junto con las coordenadas geo-espaciales y el instante de tiempo.

3.4 SOFTWARE DESARROLLADO

Los algoritmos y formatos de datos que se han desarrollado durante la realización de esta tesis doctoral permiten la grabación sincronizada de fotografías o vídeos junto con las trazas GNSS de los recorridos y con los datos procedentes de otros sensores de los que van dotados los modernos teléfonos móviles. También permiten la sincronización de los vídeos y fotografías tomadas por una cámara de vídeo comercial y las trazas de los recorridos registradas por un receptor GNSS independiente. Ello ha dado lugar al desarrollo de varias aplicaciones informáticas,

unas dedicadas a la toma de datos utilizando teléfonos móviles (*RoadRecorder*, *Clinometer*), y otras dedicadas a la reproducción sincronizada de dicha información sobre un ordenador personal (*RoadPlayer*). Todas las aplicaciones que se han desarrollado están disponibles como software libre en el repositorio público de software del autor (*Higuera de Frutos*, 2017). En el apartado dedicado al estado del arte se han detallado diversas aplicaciones y dispositivos existentes a día de hoy en el mercado que proporcionan en mayor o menor medida, dicha sincronización entre las filmaciones y las posiciones de los dispositivos GNSS.

Como consecuencia de los algoritmos, procedimientos y modelos de datos desarrollados se han desarrollado varias aplicaciones:

1. **RoadRecorder:** Es una aplicación para teléfonos móviles o tabletas con sistema operativo Android que permite la grabación sincronizada de vídeos, trazas GPS, datos del acelerómetro, datos del sensor de presión atmosférica y datos del clinómetro. La aplicación se puede utilizar en un vehículo que recorra la vía y va registrando el vídeo del recorrido a la vez que graba un fichero con datos de la traza GPS, los datos procedentes del sensor acelerómetro, los datos del sensor de presión atmosférica y los del clinómetro. El intervalo entre los datos que se graban de los sensores es configurable.
2. **RoadPlayer:** Es una aplicación desarrollada en JAVA para ordenadores de escritorio con sistemas operativos Windows, Linux o iOS que permite la visualización de los vídeos grabados con *RoadRecorder*, a la vez que se visualiza la posición del móvil sobre la cartografía y el valor de los sensores en cada instante a lo largo de toda la trayectoria del vehículo. La aplicación RoadPlayer incorpora diversas opciones que permiten su aprovechamiento para la realización de los inventarios de carreteras.
3. **Clinometer:** Es una aplicación para teléfonos móviles y tabletas dotados del sistema operativo Android que permite la grabación sincronizada del sensor clinómetro junto con la traza GPS del vehículo.

Como complemento de estas aplicaciones ha sido necesario desarrollar diferentes librerías que contienen la operativa de los algoritmos de sincronización y otros. Todos estos programas y librerías, así como las herramientas y librerías utilizadas por los programas, son software libre. Los desarrollos del autor de la tesis están disponibles en el repositorio Github del autor (*Higuera de Frutos*, 2017) y licenciados bajo una licencia Creative Commons Compartir Igual (*Creative Commons*, 2017). Esta licencia permite a cualquier usuario interesado utilizarlos, copiarlos o modificarlos a su conveniencia para poderlos adaptar al uso específico que se les quiera dar a los programas. El desarrollo de todos los programas se ha

realizado mediante una técnica incremental basada en el paradigma de la programación orientada a objetos y la técnica del *Test Driven Development*. Las jerarquías de clases se diseñaron teniendo en cuenta las *Standard Design Patterns* existentes para este tipo de desarrollos (*Gamma et al.*, 1994) y conocidas técnicas de refactorización (*Fowler*, 1999). Con el fin de facilitar la compilación y despliegue para diferentes sistemas operativos, así como la generación automática de la documentación de los programas se utilizó el software de gestión Maven (*Apache Foundation*, 2008). Se ha utilizado profusamente el software de control de versiones GIT (*Chacon and Straw*, 2014). Todo ello garantiza que los programadores interesados en modificar, adaptar o completar el desarrollo de los programas dispondrán de un software documentado, comprensible y con la suficiente trazabilidad.

3.4.1 RoadRecorder

Se ha denominado *RoadRecorder* a la aplicación desarrollada para dispositivos móviles con sistema operativo Android que permite la grabación sincronizada de vídeos junto con el valor de varios sensores del teléfono móvil.

Es importante indicar que la aplicación *RoadRecorder* está pensada para que el teléfono móvil se sitúe en el automóvil en una posición que proporciona una línea de visión muy similar a la del conductor. Esto permite que la filmación proporcione imágenes de lo que realmente ve el conductor mientras conduce. Los vídeos tomados de esta manera se pueden utilizar para estudiar los posibles defectos de perspectiva del trazado como las pérdidas de trazado u otros. En la figura 3.5 se muestra el detalle de fijación del teléfono móvil al espejo retrovisor del vehículo mediante dos gomas elásticas.

Existen diversos soportes comerciales que permiten fijar el teléfono móvil sobre el salpicadero del vehículo o sobre el propio parabrisas, mediante unas ventosas habilitadas al efecto. La mayoría están diseñados para posicionar el teléfono móvil de forma que el conductor o sus acompañantes puedan leer y visualizar la pantalla del dispositivo y se adaptan mal a la posición que necesita el teléfono de forma que la cámara, normalmente situada en la parte posterior del teléfono, pueda enfocar el recorrido de la carretera con un encuadre adecuado. Durante este estudio se probaron varios de estos soportes comerciales, optando finalmente por la solución de sujetar el teléfono móvil al espejo retrovisor mediante unos anillos de goma corrientes. La rótula del espejo retrovisor permite un encuadre muy preciso de la imagen y un punto de vista muy similar al del conductor. Como ventaja adicional, el teléfono queda en una posición en la que es fácil leer o visualizar la pantalla por

Fig. 3.5: Detalle de la fijación del teléfono móvil al retrovisor del vehículo mediante gomas elásticas

parte del conductor o de su acompañante. El interfaz de la aplicación *RoadRecorder* se ha diseñado de forma que se puedan fijar las gomas que sujetan el teléfono al retrovisor sin obstruir, ni la pantalla donde se visualiza el vídeo, ni los botones de activación y desactivación de la grabación. Además, esta posición del teléfono móvil le permite estar a una distancia adecuada de la toma de corriente de 12 v del vehículo, situada en el mechero, lo que permite que durante la utilización de la aplicación el teléfono vaya permanentemente conectado a dicha toma, pues hay que tener en cuenta que la aplicación consume mucha batería al estar activados simultáneamente el vídeo, el GPS y los sensores. En la figura 3.5 se puede ver el cable que conecta el teléfono a la toma de corriente.

El programa que se ha desarrollado utiliza los procedimientos proporcionados por el sistema operativo Android para acceder a los valores proporcionados por los sensores del dispositivo. Cada vez que un sensor proporciona un valor actualizado de su medida, Android proporciona un vector de valores en coma flotante. La interpretación de los valores de dicho vector es diferente según el sensor concreto de que se trate. La aplicación *RoadRecorder* procesa y almacena la información procedente de cuatro de estos sensores:

- **Acelerómetro:** Mide la aceleración aplicada al dispositivo y proporciona un vector con tres componentes de dicha aceleración en relación con los ejes locales del dispositivo X, Y, Z (ver figura 2.8). Este vector de aceleración incluye la influencia de la aceleración de la gravedad. Los valores de las componentes de la aceleración están medidos en unidades del Sistema

Internacional, esto es, en m/s^2 .

- *Acelerómetro lineal*: Proporciona las tres componentes de la aceleración del dispositivo, referidas al sistema de ejes locales X, Y, Z , excluyendo la influencia de la aceleración de la gravedad. Los valores vienen medidos en m/s^2 .
- *Sensor de campo magnético*: Mide la magnitud del campo magnético ambiental en los ejes locales X, Y y Z . Los valores vienen medidos en micro-Teslas (μT).
- *Sensor de presión*: Mide la presión atmosférica en hectopascales, hPa (milibares).

Conocidos los valores del acelerómetro y del sensor de campo magnético es posible calcular la orientación absoluta del dispositivo. El sistema operativo *Android* proporciona tres ángulos medidos en grados sexagesimales. El primero es el *azimut*, que es el ángulo horizontal medido desde el Norte en el sentido dextrógiro, esto es, en el sentido de las agujas del reloj. El segundo ángulo es la elevación (*pitch*, en inglés), que mide la verticalidad del dispositivo. El tercer ángulo es la escora (*roll*, en inglés), que mide la inclinación lateral del dispositivo. A partir del valor de estos tres ángulos es posible construir la matriz de rotación del dispositivo $\mathcal{R}$. Esta matriz permite realizar la transformación de las componentes de cualquier vector referido a los ejes globales ligados a la Tierra en otro cuyas componentes estén expresadas en los ejes locales del dispositivo. En la figura 2.8 se detallan los dos sistemas de ejes de referencia que se utilizan en los dispositivos Android. La expresión que relaciona las componentes de un vector en los dos sistemas de referencia es la siguiente:

$$(Vector)_{device} = (Vector)_{global} \times \mathcal{R} \quad (3.6)$$

La matriz $\mathcal{R}$ es ortogonal, con lo que su inversa es igual a su traspuesta. Utilizando esta propiedad, las componentes de un vector referidas al sistema de referencia global ligado a la Tierra se pueden obtener a partir de las componentes referidas al sistema local del dispositivo mediante la siguiente expresión:

$$(Vector)_{global} = (Vector)_{device} \times \mathcal{R}^T \quad (3.7)$$

Como se ha mencionado anteriormente, *RoadRecorder* almacena de manera continua el vídeo a la vez que va grabando las posiciones de la trayectoria del vehículo y los valores de los sensores correspondientes a cada posición. Los valores proporcionados por cada sensor y por el GPS tienen una frecuencia de actualización diferente. Mientras que los sensores proporcionan varios valores por segundo, el GPS proporciona aproximadamente una nueva posición cada segundo.

Cada vez que el GPS proporciona una nueva posición, *RoadRecorder* utiliza la información del acelerómetro y del sensor magnético para calcular la matriz de rotación $\mathcal{R}$ correspondiente a ese instante. Combinando dicha matriz de rotación con el vector de aceleración expresado en los ejes locales, *RoadRecorder* calcula el vector de aceleración en ejes globales, excluyendo el valor de la componente de la aceleración de la gravedad. El GPS proporciona la posición mediante unos valores de la longitud, la latitud y la altitud expresados en el sistema de referencia correspondiente al datum WGS84. Como se ha mencionado anteriormente, a partir de estos datos, el programa calcula la proyección UTM de dichas coordenadas.

Tras la realización de los cálculos, *RoadRecorder* graba los siguientes valores para cada punto del recorrido:

1. La fecha y la hora UTC correspondiente a la posición, proporcionada por el GPS, en formato de texto ISO-8601: «2017-01-15T14:04:23.30Z» (*International Organization for Standardization*, 2004)
2. La hora UTC de la posición, medida en milisegundos transcurridos desde las cero horas UTC del 1 de enero de 1970 (esta es la forma habitual de manejar las horas en los ordenadores)
3. La latitud, la longitud y la altitud referidas al elipsoide de referencia WGS84.
4. La velocidad, el rumbo y la precisión de la medida proporcionadas por el API GPS del sistema operativo *Android*
5. Las coordenadas UTM (x, y) de la proyección UTM del punto
6. Las componentes a_x, a_y, a_z de la aceleración del dispositivo, referidas a unos ejes globales ligados a la Tierra, centrados en la posición del dispositivo. (x, y) es el plano horizontal tangente al elipsoide, con el eje x apuntando hacia el Este y el eje y apuntando hacia el Norte. El eje z es perpendicular al plano (x, y) y apunta hacia arriba, hacia el cielo
7. El valor de la presión en hectopascales proporcionado por el sensor de presión

Como se ha comentado, todos los valores almacenados utilizan el Sistema Internacional. Para el rumbo se utilizan grados sexagesimales medidos sobre un plano horizontal tangente al suelo, desde el Norte en el sentido de las agujas del reloj.

Toda la información se almacena en simultáneamente en dos formatos: en el formato *GpxParser*, extensión del formato GPX desarrollada al efecto durante esta investigación (Higuera de Frutos, 2015a), y en el formato CSV (Comma Separated Values). Esto permite la utilización posterior de esta información por programas GIS, hojas de cálculo y otros.

La filmación de vídeo se almacena en formato *MP4*. Se trata de un formato ampliamente utilizado para el almacenamiento de vídeos por parte de los teléfonos

Fig. 3.6: Pantallas proporcionadas en las distintas secciones del programa RoadRecorder. **a):** pantalla principal; **b):** pantalla de ajuste de opciones; **c):** pantalla de ayuda, **d):** instrucciones de fijación del teléfono móvil al retrovisor

móviles y, en general, por las cámaras de vídeo digitales. Este formato es reconocido por los reproductores de vídeo habituales de los que disponen los ordenadores personales. El programa *RoadRecorder* permite seleccionar la resolución y la frecuencia de imágenes por segundo (fps) de la grabación. A partir del valor de dicha frecuencia de imágenes por segundo, fps , junto con el valor del instante de tiempo correspondiente al primer fotograma de la grabación, es posible sincronizar a posteriori cada fotograma del vídeo con la correspondiente posición de la trayectoria del vehículo. Dependiendo de la resolución y el *frame rate* (fps) seleccionados, las necesidades de almacenamiento de las grabaciones pueden ser importantes, por lo que pueden ser necesarias tarjetas de expansión de memoria en el teléfono. La tabla 3.1 muestra las necesidades de almacenamiento para 1 s de grabación de vídeo, en función de la resolución y del ratio de fotogramas por segundo.

El problema de sincronización entre el reloj del GPS, que da los tiempos de las posiciones, y el reloj del propio dispositivo, que da los tiempos de los metadatos del vídeo, se resuelve sobrescribiendo los metadatos del vídeo correspondientes al inicio de la grabación, con el instante de tiempo proporcionado en ese momento por el dispositivo GPS, como ya se ha indicado.

Tabla 3.1: *Requerimientos de almacenamiento de 1 segundo de grabación de vídeo, en función de la resolución y del ratio f_{ps}*

Anchura X Altura (pixel)	fps (fotograma / s)	Almacenamiento (Kbytes / s)
640x480	30	404
1920x1080	30	1454

Fig. 3.7: *Controles e informaciones ofrecidas en la pantalla principal de la aplicación RoadRecorder*

En definitiva, cada grabación de un recorrido realizada con *RoadRecorder* da lugar a la grabación de tres ficheros en el teléfono móvil: el vídeo y el sonido se graban en un fichero con extensión *.mp4*; la traza del recorrido y el valor de los sensores se guardan en un fichero con extensión *.gpx*, utilizando el formato *GpxParser*; adicionalmente, la traza y el valor de los sensores también se guardan en un fichero con extensión *.csv*, de manera que la información sea utilizable con hojas de cálculo o editores de texto. Los nombres de los tres ficheros almacenados contienen la fecha y hora UTC del instante de comienzo de la grabación en el formato 'AAAAMMDD_HHMMSS'. Este dato será el que utilicen posteriormente las aplicaciones de visualización para proceder a la sincronización del vídeo y el sonido con las posiciones y el valor de los sensores. Los ficheros se pueden copiar desde el dispositivo Android a un ordenador personal para su análisis, visualización o tratamiento.

RoadRecorder incorpora síntesis de voz, y proporciona mensajes hablados informando de las incidencias del programa, como posibles pérdidas de señal GPS, inicio y fin de la grabación y cualquier otro mensaje de texto que aparezca en

pantalla, de forma que el conductor o el acompañante que opere la grabación no tengan que estar atentos continuamente a la pantalla.

En la figura 3.6a se muestra la pantalla principal de la aplicación. La figura 3.6b muestra la pantalla para selección de los parámetros opcionales del programa: resolución de los vídeos grabados, activación de la grabación de las trazas en ficheros CSV, activación de los mensajes mediante síntesis de voz y espacio mínimo en disco para comenzar las grabaciones. La figura 3.6c y la figura 3.6d muestran las pantallas de ayuda e instrucciones, donde se dan avisos de los consumos de batería, de los directorios donde quedarán grabados los vídeos y las trazas e instrucciones acerca de cómo fijar el teléfono al retrovisor.

En la figura 3.7 se detallan los controles e informaciones ofrecidas en la pantalla principal de la aplicación.

3.4.2 RoadPlayer

Se ha desarrollado una aplicación para ordenadores personales que permite reproducir de manera sincronizada grabaciones de vídeo y trazas GNSS. La aplicación se ha denominado *RoadPlayer*. En principio, la aplicación *RoadPlayer* está pensada para reproducir las grabaciones hechas con teléfonos móviles *Android* utilizando el programa *RoadRecorder*, pero también permite reproducir grabaciones de vídeo hechas con cualquier cámara y trazas registradas con cualquier dispositivo GNSS.

Se han hecho pruebas del programa, utilizando grabaciones hechas con *RoadRecorder*, en tareas de inventariado y auditoría de trazado de las carreteras M-513, M-607 y M-633 de la Comunidad de Madrid. Se trata de carreteras de calzada única y doble sentido de circulación, con un carril en cada sentido. También se ha realizado una prueba en una vía forestal, el Camino de Matarrubia en el término municipal de Moralarzal. Los resultados de estas pruebas se detallan en el apartado 3.5.

El programa ofrece numerosas opciones de utilidad para la reproducción de los vídeos y su aprovechamiento en la confección de los inventarios. En el anexo A se explican detalladamente.

Los mapas de fondo que utiliza *RoadPlayer* están suministrados en directo por un servidor de mapas vía Internet (*Web Map Service, WMS*), desarrollado ex-profeso para dar servicio a *RoadPlayer* y alojado en el servidor del autor. El *WMS* está implementado con el software *Maproxy* ((*Omniscale GmbH and Co. KG*, 2015)). *MapProxy* es un servidor de teselas y proxy *WMS Open Source*, que

acelera las aplicaciones de mapas a través de la pregeneración de *tiles*, que puede integrar múltiples fuentes de datos y las almacena en una caché.

La versión actual del servidor de mapas de *RoadPlayer* incorpora el mapa base y las ortofotografías más recientes del Instituto Geográfico Nacional y el mapa de OpenStreetMap. El servidor está configurado para servir las capas de los mapas en el sistema de referencia EPSG:4326 (Coordenadas geográficas en el elipsoide WGS84) o en el sistema de referencia EPSG:3857 (Web Mercator).

El programa *RoadPlayer* utiliza de manera exhaustiva todas las librerías y procedimientos desarrollados por el autor y que se describen en otros apartados de esta tesis. En concreto se utilizan los algoritmos de sincronización directa e inversa de vídeos y GNSS descritos en el apartado 3.2. También se utiliza la librería *GpxParser* para la gestión de los archivos GPX genéricos y los archivos de trazas en formato extendido *GpxParser*. *GpxParser* es también la encargada de las exportaciones de capas vectoriales a diversos formatos. La librería *GpxParser* está descrita en el apartado 3.3. La gestión del panel de cartografía se realiza mediante otra librería desarrollada por el autor denominada *TrackMap*, basada en *Geotools*, y que permite el manejo de las trazas en formato *GpxParser* y del icono en movimiento del móvil durante su visualización en pantalla (Higuera de Frutos, 2015b). El geoetiquetado de vídeos y fotografías se realiza siguiendo las especificaciones del formato EXIF (Japan Electronic Industry Association, 2012) mediante otra librería del autor denominada *ExifUtil*.

El programa *RoadPlayer* está disponible como software de código abierto bajo licencia *Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License*. Los términos de la licencia se pueden consultar en:

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

3.5 ENSAYOS REALIZADOS

Todos los ensayos llevados a cabo se hicieron utilizando los programas desarrollados. Por ello, fue necesario proceder en dos fases: en primer lugar desarrollar y probar el correcto funcionamiento de los programas; en segundo lugar, utilizar los programas desarrollados para realizar los ensayos de campo con datos reales tomados en las carreteras. Es por ello que hay dos tipos de ensayos: comprobación del correcto funcionamiento de los programas y realización de operaciones de inventario en carreteras.

En primer lugar se realizaron diversas pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de los programas. Todos los desarrollos se hicieron siguiendo la

técnica denominada *Test Driven Development*, lo que implica la codificación de cientos de tests unitarios que ponen a prueba cada rutina cada vez que se compila el programa. De esta forma, se facilita la detección de errores en el caso de iteraciones transitivas entre diferentes subprogramas. Se hicieron también pruebas para comprobar la validez de los ficheros generados por *RoadRecorder*, visualizando los vídeos con un reproductor estándar y realizando algunos cálculos SIG y operaciones de análisis geospacial de las trazas con los programas *gvSIG* (*gvSIG*, 2004), *QGIS* (*OSGEO: Open Source Geospatial Foundation*, 2002) y las bases de datos *PostgreSQL* (*PostgreSQL Global Development Group*, 1986) y *PostGIS* (*Ramsey et al.*, 2001). Se pueden destacar las siguientes pruebas concretas:

- *Comprobación de vídeos*: se visualizaron los vídeos con el reproductor estándar del ordenador y se comprobó su funcionamiento. También se utilizó el programa *ExifTools* (*Phil Harvey*, 2017) para extraer los metadatos de los vídeos y comprobar que los añadidos por el programa *RoadRecorder* quedaban correctamente grabados en el vídeo
- *Formato CSV*: se comprobó que los ficheros en formato CSV generados podían ser leídos con el software de hoja de cálculo y que estaban bien formados, cada línea un registro de valores separados por comas, sin faltar datos
- *Formato GpxParser*: se comprobó que los ficheros en formato *GpxParser* generados eran correctos y podían ser leídos y analizados con los programas SIG
- *Comprobación de coordenadas geográficas*: se visualizaron las trazas obtenidas en coordenadas longitud, latitud del sistema de referencia WGS84 sobre ortofotografías del IGN para comprobar que eran correctas. En la figura 3.8 se puede ver la proyección de dos de las trazas grabadas con *RoadRecorder* en la carretera M-513 sobre la ortofotografía del IGN en una zona de curva. La imagen se obtuvo con *QGIS*
- *Coordenadas UTM*: se visualizaron las trazas en coordenadas UTM generadas sobre las anteriores ortofotografías para comprobar que los cálculos de la proyección se hacían de manera correcta y daban lugar a los mismos puntos que las trazas de las coordenadas longitud y latitud
- *Proyecciones de RoadPlayer*: durante la reproducción con *RoadPlayer* se utilizó como mapa base la hoja 0558-4-h30 del Mapa Topográfico Nacional a escala 1 : 25000 del Instituto Geográfico Nacional, en el sistema de referencia ETRS89. Mediante la visualización de la traza proyectada sobre el mapa, se pudo comprobar que la proyección UTM de la traza que realiza «*al vuelo*» el programa *RoadPlayer* es correcta

- *Sincronización video-traza*: también se comprobó la sincronización entre las coordenadas de la posición del móvil durante la reproducción y los fotogramas correspondientes, comprobando los puntos significativos, como puentes, cruces de carreteras y otros elementos destacados que aparecen en el mapa y se pueden visualizar en el vídeo. La comprobación se hizo en los dos sentidos: sincronización directa y sincronización inversa

Fig. 3.8: Proyección de las trazas de la M-513 sobre la ortofotografía del IGN

Respecto de los ensayos para la realización de operaciones de inventario en carreteras reales, se hicieron pruebas en tres carreteras de calzada única y doble sentido de circulación de la Comunidad de Madrid:

- *Operaciones básicas de inventario*: se comprobó la situación de los elementos en las carreteras respecto de la que figura en los mapas del IGN. En concreto se comprobó la situación de los hitos kilométricos y el trazado en las carreteras M-607 y M-513
- *Defectos de perspectiva*: se utilizaron notas de voz georreferenciadas grabadas con *RoadRecorder* y la visualización posterior de los vídeos con *RoadPlayer* para analizar los defectos de perspectiva de la carretera M-513
- *Cálculo del eje de la carretera*: se utilizaron las trazas GNSS grabadas con *RoadRecorder* para calcular el eje de las carreteras M-633 y M-607

3.5.1 Toma de datos

La toma de datos se realizó con el programa *RoadRecorder*. Los teléfonos móviles utilizados fueron un *Samsung Galaxy SIII* y un *Nexus 5*. El teléfono se fijó al espejo retrovisor del vehículo en la forma explicada en anteriores apartados y que se puede ver en la figura 3.5.

Los recorridos se realizaron procurando mantener una velocidad constante y una trayectoria paralela al eje de la carretera. La velocidad de circulación se ajustó al tráfico existente en las carreteras, de manera que no se causaran inconvenientes al mismo, resultando velocidades entre 50 y 80 km/h.

Las filmaciones de vídeo se realizaron con un ratio de 30 fotogramas por segundo y con una resolución de 640x480 píxeles. Con la velocidad de recorrido utilizada, estas filmaciones dan lugar a 1 fotograma cada 50 cm de recorrido, aproximadamente.

La frecuencia del GPS de los teléfonos móviles es de 1 s. Con esta frecuencia de muestreo y las velocidades a las que se hicieron los recorridos, la separación media entre puntos fue de entre 12 y 22 m.

3.5.2 Procesamiento de los datos

Las tomas de datos con *RoadRecorder* dan, como resultado de las grabaciones, tres ficheros por cada recorrido:

- **mp4**: el fichero con la filmación de vídeo
- **csv**: fichero de la traza en formato *Comma Separated Values* para su inspección mediante hojas de cálculo
- **gpx**: fichero de la traza en formato *GpxParser*

Los ficheros se descargaron desde el teléfono móvil al ordenador personal para poder reproducirlos con el programa *RoadPlayer*, que se utilizó para visualizar los recorridos y extraer las informaciones que acompañan este estudio. Los mismos datos de las grabaciones son los que se utilizan en el apartado 5.10 para realizar la reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal.

3.5.3 Operaciones básicas de inventario

La M-513 es una carretera de calzada única y doble sentido de circulación. Se ha ensayado el tramo que enlaza las localidades de Boadilla del Monte y Brunete, en la provincia de Madrid. La longitud del tramo es de 8 kilómetros.

La tabla 3.2 muestra el resumen de los datos de las grabaciones efectuadas en la carretera M-513. Las columnas de la tabla corresponden a la designación de la carretera, la traza y el sentido de recorrido, la resolución del vídeo en píxeles, la duración en minutos, el ratio de fotogramas por segundo, el número de puntos de la traza, su longitud en metros, y las velocidades máxima y media de recorrido.

Tabla 3.2: Datos de las grabaciones realizadas con RoadRecorder en la carretera M-513

Carretera	Vídeo			Traza			
	Resol.	Dur. (min)	fps	Ptos	L (m)	$V_{max} (\frac{km}{h})$	$V_{med} (\frac{km}{h})$
M-513 T1 Asc	640 × 480	12	30	661	7867	52,1	39,3
M-513 T2 Desc	640 × 480	9	30	538	6585	64,1	42,3
M-513 T3 Asc	640 × 480	9	30	521	6144	50,5	40,1
M-513 T4 Desc	640 × 480	9	30	533	6511	51,8	42,3

La simple visualización de los vídeos puede utilizarse para estudiar características físicas de las carreteras, como el tipo y estado general de los pavimentos, el número de carriles, existencia de arcenes, estado de la señalización vertical y horizontal, estado de las barreras de contención, entre otros. Así mismo, la filmación periódica de los recorridos puede proporcionar un archivo histórico de «*estado actual*» de las carreteras que puede servir para comprobar las condiciones de conservación de los distintos elementos en las fechas de las filmaciones y su evolución en el tiempo. Los cambios significativos también quedarán reflejados en los vídeos, como las modificaciones de trazado, refuerzos de firme, construcciones al borde de la carretera, instalación de nuevos elementos de señalización, alumbrado o balizamiento y otros.

La visualización simultánea de los vídeos georreferenciados, a la vez que se reproduce la posición del vehículo sobre la cartografía proporciona una herramienta de utilidad para el mantenimiento de la base de datos del inventario. *RoadPlayer* se puede utilizar para mantener y chequear una base de datos ya existente. Ese ha sido el procedimiento que se ha utilizado para comprobar la posición de los hitos kilométricos de la carretera M-513 y compararlos con los que aparecen en el mapa del Instituto Geográfico Nacional. Para ello, se cargó en el panel del mapa de *RoadPlayer*, los ficheros vectoriales de la carretera y los puntos kilométricos procedentes del IGN, a la vez que se visualizaban el vídeo, la traza del recorrido y las evoluciones del vehículo sobre el mapa. El tramo de carretera estudiado es el comprendido entre el PK 8 y el PK 17. Al reproducir los vídeos de

los recorridos se pudo comprobar que los hitos kilométricos de la carretera actual no están situados en los mismos puntos que los indicados en el mapa. Mediante *RoadPlayer* se midió la distancia entre las posiciones teóricas y las reales. El resultado de la comparación se puede ver en la tabla 3.3, donde se muestran las coordenadas UTM de los hitos kilométricos del mapa, las de los hitos existentes en el trazado actual de la carretera, y la distancia entre la posición del hito en el mapa y su posición real. En la figura 3.9 se puede ver la pantalla de *RoadRecorder* en el momento de alcanzar la posición del PK-14 de la carretera. En la figura 3.10 se puede ver la proyección sobre el la hoja 0558-4 del Mapa Topográfico Nacional escala 1:25000 de la posición actual del PK-14 y de la posición marcada en el mapa.

Fig. 3.9: M-513: Pantalla de *RoadPlayer* en el momento de alcanzar la posición del PK-14

Los vídeos georreferenciados se pueden utilizar también para añadir nuevos elementos a una base de datos de un inventario, por ejemplo, los elementos de señalización vertical o los puntos kilométricos. *RoadRecorder*, además de grabar el vídeo graba el sonido, y se ha comprobado que es muy útil que el operador de *RoadRecorder* añada notas de voz a las grabaciones para la correcta identificación de algunos elementos. Estas notas de voz se deben hacer en el momento que el vehículo pasa a la altura del elemento, perpendicular a la trayectoria. De esta forma, durante la reproducción con *RoadPlayer*, se puede detener el vídeo en ese instante y anotar las coordenadas exactas que proporciona el GPS para esa posición. En el caso de los elementos lineales, como las marcas de señalización horizontal, las barreras de contención o el paso de puentes, el operador tiene que añadir la nota de voz al pasar por el inicio y el final del elemento que se pretende

Fig. 3.10: M-513: Proyección sobre el mapa del IGN de la posición del PK-14

inventariar. La información de las distancias de recorrido proporcionadas por *RoadPlayer* se pueden utilizar para medir la longitud de los elementos lineales y también para calcular las distancias entre unos y otros elementos.

Se hizo la misma comprobación de los hitos kilométricos en el caso de la M-607. En este caso no se encontró ninguna discrepancia entre los datos de la cartografía del IGN y la posición actual de los hitos. Si se detectó, en cambio, una discrepancia en el trazado. Añadiendo al panel del mapa de *RoadPlayer* un fichero vectorial con el eje de la carretera se puede comprobar la concordancia entre la traza grabada y el trazado teórico. Así se hizo con el trazado de la M-607, comprobando que el trazado de la capa vectorial del IGN no recoge algunas modificaciones de trazado que se han hecho en la carretera. En la figura 3.11 se pueden ver la traza GNSS grabada (línea de puntos) y la línea de la carretera M-607 en el mapa del IGN (línea continua) proyectadas sobre la ortofotografía, entre los puntos kilométricos PK36+041 y PK36+700. Se puede observar que el trazado actual de la carretera no coincide con el que hay registrado en la capa vectorial del Mapa Topográfico Nacional.

3.5.4 Defectos de perspectiva y pérdidas de trazado

La colocación del teléfono móvil que realiza las grabaciones en el espejo retrovisor del vehículo proporciona un encuadre de los fotogramas muy similar al del punto de vista del conductor (ver figura 3.5). Este procedimiento se puede aprovechar para

Tabla 3.3: Datos de los hitos kilométricos de la carretera M-513

PK	X_{mapa}	Y_{mapa}	X_{real}	Y_{real}	distancia
8	423635	4473963	423561	4473996	-81
9	422765	4474447	422733	4474471	-40
10	421723	4474055	421865	4474181	190
11	420788	4474057	420953	4473977	183
12	419861	4474222	420038	4474273	184
13	418931	4473995	419138	4473986	207
14	418042	4473642	418226	4473673	187
15	417079	4473429	417283	4473471	208
16	416221	4472983	416407	4473010	188

Fig. 3.11: M-607: Proyección sobre ortofotografía de la traza del eje calculado y de la línea de la carretera procedente del IGN, donde se muestra que la línea del IGN (en trazo continuo) no sigue el trazado actual de la carretera

realizar un análisis de algunos defectos de perspectiva del trazado motivados por una incorrecta coordinación entre el trazado de las alineaciones en planta y las del perfil longitudinal.

Siguiendo este método se ha realizado un análisis de la carretera M-513. Se eligió esta carretera por la existencia de numerosos defectos de perspectiva a lo

Fig. 3.12: *Fotograma de pérdida de orientación en el PK8+180 de la M-513 sentido ascendente*

largo de su recorrido, que convierten algunos de sus tramos en potencialmente peligrosos de cara a la seguridad de la circulación. Una vez más, las notas de voz del conductor o del acompañante durante la grabación son de gran utilidad para la correcta identificación de estas situaciones. Durante la grabación de la M-513, el conductor fue nombrando de viva voz los instantes en que detectaba una pérdida de trazado, para poder comprobar a posteriori, durante la reproducción con *RoadPlayer*, que dichas pérdidas de trazado se podían identificar también en los vídeos. De hecho, así se comprobó, la identificación en los vídeos de las pérdidas de trazado coincidía con los instantes en los que el conductor señalaba su existencia. Mediante *RoadPlayer* se identificaron los PK en los que se producían dichas pérdidas de trazado. En la tabla 3.4 se resumen los resultados del análisis realizado. Se identificaron trece pérdidas de trazado que fueron clasificadas de acuerdo con la norma 3.1 IC del año 2016 (*Ministerio de Fomento*, 2016). La figura 3.12 muestra un fotograma extraído de *RoadPlayer* correspondiente a la pérdida de orientación del PK 7+900. La figura 3.13 muestra el fotograma correspondiente a la pérdida dinámica del PK 14+380.

3.5.5 Cálculo del eje

Se han realizado diferentes ensayos para calcular el eje de carreteras de calzada única y doble sentido de circulación a partir de trazas GNSS de teléfonos móviles

Fig. 3.13: Fotograma de pérdida dinámica de trazado en el PK14+380 de la carretera M-513 en sentido ascendente

grabadas con el programa *RoadRecorder*. Para ello se ha desarrollado un programa que calcula el eje de la carretera promediando dos o mas trazas GNSS de la misma, aplicando el procedimiento descrito por Castro et al. (2006) y que se menciona en el apartado 2.6.1 (Castro et al., 2006).

El programa recibe como entrada de datos dos ficheros CSV con las coordenadas (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}) y (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}) de dos trazas de una carretera. Como se ha comentado, uno de los ficheros que entrega el programa *RoadRecorder* al grabar las trazas es el fichero CSV con las coordenadas proyectadas UTM en el sistema de referencia ETRS89, por lo que el procesamiento de los datos se limitó a eliminar las columnas innecesarias de esos ficheros, dejando exclusivamente las columnas con los valores (x_i, y_i, z_i) .

Las trazas correspondientes a los recorridos de la carretera en el sentido descendente del kilometraje quedan invertidas respecto de las del recorrido ascendente, esto es, las trazas descendentes comienzan en las secciones de la carretera donde terminan las trazas ascendentes. Opcionalmente, el programa invierte el sentido de una de las trazas para que las dos trazas queden con la misma orientación. Este proceso no afecta al resultado, resultando el mismo eje se invierta o no el sentido de la traza. En los ensayos realizados sí que se invirtió el sentido de la traza descendente.

Para cada punto de la primera traza, el programa busca el punto más próximo

Tabla 3.4: Defectos de perspectiva en la carretera M-513, en el sentido ascendente

PK	Tipo de defecto	Comentario
7+900	Pérdida de orientación	Curva a dcha sobre convexo
8+180	Pérdida dinámica	Curva a izda sobre convexo+cóncavo
9+400	Pérdida combinada	Curva a izda sobre convexo+cóncavo
9+800	Pérdida de orientación	Curva a dcha sobre convexo
10+040	Pérdida de trazado	Recta con acuerdo convexo
11+000	Pérdida dinámica	Curva en S sobre convexo+cóncavo
13+500	Pérdida de orientación	Curva a izda sobre convexo
13+850	Pérdida dinámica	Curva en S sobre convexo+cóncavo
14+080	Pérdida de orientación	Curva a izda sobre convexo
14+380	Pérdida dinámica	Curva en S sobre convexo+cóncavo
15+400	Pérdida de trazado	Recta con acuerdo convexo
15+620	Pérdida combinada	Curva a izda sobre convexo+cóncavo
16+270	Pérdida combinada	Curva a dcha sobre convexo+cóncavo

en la segunda traza, calcula los valores medios de las coordenadas y guarda el resultado en una nueva traza correspondiente al eje promediado. Al final del proceso, el programa entrega como salida un fichero CSV con las coordenadas (x_{ei}, y_{ei}, z_{ei}) del eje calculado de la carretera.

Los ensayos se han hecho en dos tramos de carreteras de la Comunidad de Madrid:

- Carretera M-607, tramo de 12 Km entre Colmenar Viejo y Cerceda
- Carretera M-633, tramo de 6 Km entre Cabanillas de la Sierra y Valdemanco

3.5.6 Ensayo de cálculo del eje en la carretera M-607

Se aplicó el procedimiento al tramo de 12 Km de la carretera M-607 en Madrid, comprendido entre las localidades de Colmenar Viejo y Cerceda, utilizando un recorrido en sentido ascendente y otro en sentido descendente. Las trazas se grabaron con un teléfono móvil utilizando el programa RoadRecorder. La traza del sentido descendente se invirtió antes de calcular el eje como promedio de las dos trazas.

La tabla 3.5 resume los datos de las trazas utilizadas en el cálculo del eje de la M-607. En la figura 3.14 se puede ver un detalle de dicha visualización, donde se aprecia que el cálculo de los puntos medios proporciona resultados del eje mejorados respecto de cualquiera de las dos trazas de individuales.

Tabla 3.5: Descripción de las trazas utilizadas en el cálculo del eje de la carretera M-607 (Trazas grabadas con un teléfono móvil utilizando el programa RoadRecorder)

Nº	Datos	Traza	Traza				
			L (m)	Puntos	Sep (m)	H max	H min
1	GPS	Ascendente	12020	498	24,2	1003,9	911,3
2	GPS + Prog	Desc invertido	12023	558	21,6	1003,8	910,6
3	Programa	Eje calculado	12018	498	24,2	1002,8	912,8

Se realizó el cálculo de errores comparando la traza del eje obtenida por cálculo con la línea de la carretera M-607 disponible en el Instituto Geográfico Nacional. Para ello se descargaron las capas correspondientes, en formato *shapefile*, desde las distintas hojas en las que figura en el MTN 25 (*Centro Nacional de Información Geográfica*, 2017). Se proyectaron las dos capas de puntos, la del eje y la del IGN, sobre las ortografías del PNOA (*Centro Nacional de Información Geográfica*, 2016), para su inspección visual, comprobando que la línea del IGN no seguía el eje de las ortofotos y en varios tramos ni siquiera el trazado actual de la carretera (ver figura 3.11). El trazado de la línea del IGN sigue más bien el trazado de uno de los carriles actuales. Aun así se midieron errores en un tramo de 8.6 km. Los resultados obtenidos se pueden ver en la tabla 3.6. Se comprueba que el error medio de 2,25 m es muy elevado para cálculos de la geometría, pero la precisión puede ser suficiente para la localización de elementos de inventario y mejora la de cualquiera de las dos trazas individuales.

3.5.7 Ensayo de cálculo del eje en la carretera M-633

La M-633 es una carretera de montaña de calzada única y dos carriles de circulación, uno en cada sentido. Enlaza las localidades de Cabanillas de la Sierra y Valdemanco, en el noroeste de Madrid. Se grabaron cuatro trazas utilizando el programa *RoadRecorder*, dos en cada sentido de recorrido. El resumen de los datos de estas trazas puede verse en la tabla 3.7. Las trazas 3 y 6 de la tabla

Fig. 3.14: Carretera M-607: visualización de las trazas empleadas en el cálculo del eje de la carretera y de la traza resultado (Trazas grabadas con un teléfono móvil utilizando el programa desarrollado en la tesis RoadRecorder)

Tabla 3.6: Errores en el cálculo del eje de la carretera M-607 a partir de dos trazas procedentes del receptor GNSS de un teléfono móvil

Longitud (m)	12456,2
Puntos	558
Error máximo (m)	7,128
Error mínimo (m)	0,001
Media del error (m)	2,246
Desviación típica (m)	1,787

corresponden a los ejes promediados a partir de las trazas (1,2) y (4,5). Para ello, primero se obtuvo la traza invertida del sentido descendente del recorrido.

En la figura 3.15 se puede ver el detalle de la proyección de dos de las trazas y del eje calculado sobre las ortofotografías del PNOA, en determinado tramo del recorrido.

Tabla 3.7: Descripción de las trazas utilizadas en el cálculo del eje de la carretera M-633 (Trazas grabadas con un teléfono móvil utilizando el programa desarrollado en la tesis *RoadRecorder*)

Nº	Datos	Traza	Traza				
			L (m)	Puntos	Sep (m)	H max	H min
1	RoadRecorder	Ascendente	6548	557	11,8	1163,3	976,1
2	RoadRecorder + Prog	Desc invertido	6585	538	12,3	1170,3	985,2
3	Programa	Eje de 1 y 2	6548	557	11,8	1164,8	980,6
4	RoadRecorder	Ascendente	6143	521	11,8	1137,0	975,9
5	RoadRecorder + Prog	Desc invertido	6149	508	12,1	1155,2	983,9
6	Programa	Eje de 1 y 2	6132	521	11,8	1146,1	980,2

Fig. 3.15: Carretera M-633: visualización de las trazas empleadas en el cálculo del eje de la carretera y de la traza resultado (Trazas grabadas con un teléfono móvil utilizando el programa desarrollado en la tesis RoadRecorder)

3.6 CONCLUSIONES

Los ensayos realizados permiten extraer las siguientes conclusiones:

- El formato de datos *GpxParser* desarrollado es compatible con los programas SIG y las trazas generadas en ese formato pueden ser visualizadas y analizadas con el software de análisis existente
- Las grabaciones de vídeo realizadas con *RoadRecorder*, fijando el teléfono móvil en el espejo retrovisor, se pueden utilizar para analizar los defectos de perspectiva de la carretera.
- Los algoritmos de sincronización directa e inversa funcionan correctamente, proporcionando una precisión equivalente a la del receptor GPS
- La combinación de *RoadRecorder* y *RoadPlayer* se puede utilizar como método de bajo coste y de despliegue rápido para la creación y mantenimiento de inventarios

4. MODELO DE DATOS Y CASOS DE ESTUDIO

4.1 INTRODUCCIÓN

Una de las hipótesis de las que se ha partido en este trabajo es que los procedimientos actuales para la realización de inventarios de carreteras no dan una solución adecuada para todos los tipos de vías ni para las necesidades de información de todos los agentes interesados en las mismas.

Los inventarios tratan de representar de manera simplificada las características de las carreteras y de los elementos que las componen. En esencia, un inventario de carreteras es una base de datos de información geográfica. La información correspondiente a cada elemento del inventario tiene dos componentes:

1. *Componente espacial*: se refiere a la posición que ocupa el elemento dentro del sistema de referencia elegido, así como a su forma o geometría. Proporciona la localización y la geometría de los elementos. Responde a las preguntas *¿Dónde está?* y *¿Qué forma tiene?*
2. *Componente temática*: establece la naturaleza y las características específicas de los elementos, sus propiedades concretas y el valor de las variables que se quiere registrar. Responde a la pregunta *¿Qué es?*

Hay una tercera componente que es necesario gestionar en ocasiones. Se trata de la componente temporal. Tanto la información espacial como la información temática de los elementos del inventario pueden variar a lo largo del tiempo. En los casos en los que sea necesario llevar registro de estas variaciones, habrá que establecer un procedimiento para gestionar el estado de las variables en diferentes momentos.

Para definir un procedimiento de inventariado hay que resolver tres problemas:

1. El modelo de datos
2. El formato de almacenamiento
3. El mecanismo para organizar y acceder a la información almacenada

Esta tesis doctoral propone un modelo de datos genérico, un formato de almacenamiento basado en estándares abiertos y la organización de la información mediante un esquema de base de datos «No-SQL».

La metodología de trabajo que se propone permite realizar los inventarios sin

necesidad de definir a priori un modelo de datos detallado de los mismos. Se comienza con un modelo muy simplificado y los usuarios van construyendo y adaptando el inventario a sus necesidades concretas, a medida que estas se van manifestando. El proceso se realiza en dos fases: la recogida de la información espacial y la incorporación de la información temática de los elementos. Esta metodología de trabajo proporciona algunas ventajas frente a los procedimientos de inventariado existentes:

- Los inventarios se pueden realizar de manera incremental, comenzando con modelos sencillos que se van ampliando a medida que surgen nuevas necesidades de información
- Los agentes interesados puede reutilizar la información de un inventario existente, añadiendo nuevos elementos o nueva información temática a los elementos ya existentes, que adapte el inventario a sus necesidades
- Se reducen los tiempos de inicio de los trabajos, procesamiento de la información y publicación de los resultados
- Los trabajos se pueden realizar con personal no especializado en la realización de inventarios de carreteras
- Se pueden realizar los inventarios con medios de bajo coste

Este capítulo de la tesis se propone alcanzar dos objetivos. En primer lugar, desarrollar un modelo de datos que permita explotar de manera eficiente la información de los inventarios de cualquier tipo de vía y destinados a cualquier tipo de agente interesado. En segundo lugar, describir una metodología de trabajo que permita realizar los inventarios de manera incremental utilizando software de código abierto, herramientas de bajo coste y procedimientos de trabajo colaborativo. El capítulo está estructurado en varios apartados que se detallan a continuación.

El apartado 4.2 realiza la explicación del modelo de datos propuesto. Se analiza el mecanismo de «*etiquetas*» utilizado para la información temática de los elementos y las primitivas geométricas que se utilizan para resolver la información espacial.

Los apartados 4.4 y 4.5 explican cómo incorporar al modelo de datos los sistemas de referencia lineal y las técnicas de segmentación dinámica.

El apartado 4.6 explica la manera de describir la geometría de la carretera: trazado en planta, perfil longitudinal y sección transversal. También se explica en este apartado cómo abordar la definición de otras variables, como el tipo de firme, la visibilidad, la velocidad máxima permitida, las restricciones del gálibo y otras.

El apartado 4.7 hace algunos comentarios generales acerca de la problemática relacionada con variables cuyo valor varía con frecuencia, como pueden ser las

condiciones del tráfico, la existencia de accidentes en algunas secciones o la reducción en el número de carriles por obras. También se detalla en este apartado la manera de etiquetar los elementos del inventario de manera que se puedan utilizar varios idiomas de manera simultánea.

El apartado 4.8 explica los pasos a seguir y las herramientas disponibles para la realización de los inventarios aplicando el modelo de datos propuesto.

En el apartado 4.9 se estudian algunos casos de aplicación práctica. Por una parte se dan algunos ejemplos de vías no destinadas al tráfico de automóviles resueltas con el modelo de datos propuesto: Camino de Santiago (España), vía ciclista en Cambridgeshire (Reino Unido), vía ciclista en Sydney (Australia) y línea de autobuses en Ashod (Israel). También se muestra cómo aplicar el modelo a una carretera convencional: la carretera M-607 en la provincia de Madrid (España). El último ensayo realizado es el inventariado completo del camino forestal de subida al Monte de Matarrubia, en el término municipal de Moralarzal (Madrid, España), como ejemplo de inventariado de una vía no convencional.

Por último, el apartado 4.10 detalla las conclusiones a las que se ha llegado tras analizar los ensayos realizados.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE DATOS

El modelo de datos para inventarios de carreteras que propone esta tesis está basado en el modelo de datos desarrollado por *OpenStreetMap*. Se trata de un modelo genérico para la representación de información geográfica vectorial. En el apartado 2.5.5 se explicaron las ventajas que ofrece este formato de datos.

En este modelo cada elemento del inventario tiene dos tipos de información: la información espacial y la información temática. Para definir la información espacial se utilizan dos tipos de primitivas geométricas: *Nodes* y *Ways*. La primitiva «*Node*» se emplea para representar elementos cuya geometría es asimilable a un punto. La primitiva «*Way*» se utiliza para representar elementos con geometría asimilable a una línea, abierta o cerrada. Además, el modelo de datos de *OpenStreetMap* define un tercer tipo de elemento, que denomina «*Relation*», que permite modelizar geometrías más complejas, relaciones topológicas y otros tipos de geometrías o relaciones entre elementos no cubiertas por el esquema básico. Esta última característica permite la extensión del modelo de datos, y es la que se utiliza en esta tesis para incorporar al modelo básico los elementos necesarios en los inventarios de carreteras.

Para definir la información temática se utilizan «*etiquetas*» (*tags*). Cada etiqueta

es una pareja de valores alfanuméricos, denominados «clave» (*key*) y «valor» (*value*). Las etiquetas son las encargadas de añadir, a cada primitiva geométrica, la información temática que las dota de significado conceptual en el modelo (Higuera de Frutos and Castro, 2016; Ramm et al., 2011; Bennet, 2010; Beiglboeck, 2011).

Con el fin de intercambiar información entre diferentes aplicaciones, *OpenStreetMap* define el formato de almacenamiento *OSM*. Se trata de un formato de datos de la familia de formatos XML. Los documentos en formato OSM dan lugar a los ficheros de extensión *.osm*. Cada fichero *.osm* es, en realidad, una capa vectorial SIG. Actualmente es un formato reconocido por la mayoría de programas SIG, bases de datos geoespaciales y librerías de análisis espacial.

Existen numerosas herramientas de software libre que permiten la consulta, edición, visualización y análisis de la información contenida en las capas vectoriales *.osm*. Por este motivo, en esta tesis se ha escogido mantener, en la medida de lo posible, la compatibilidad del modelo de datos desarrollado con el formato de ficheros *.osm*. De esta manera se pueden aprovechar dichas herramientas en los inventarios de carreteras creados siguiendo la metodología propuesta.

4.2.1 Información temática: etiquetas (*tags*)

La información temática de los elementos del inventario se incorpora a través de «etiquetas» (*tags*). Cada etiqueta está formada por dos valores alfanuméricos: la «clave» (*key*) y el «valor» (*value*). Un ejemplo de una de tales etiquetas podría ser: «NOMBRE = N-320». Esta «etiqueta», podría ser una manera de asignar la denominación *N-320* a un determinado elemento lineal que representase a la carretera Nacional 320.

Cada primitiva geométrica puede incorporar un número indeterminado de etiquetas que definan adecuadamente la información temática asociada con dicho elemento. La figura 4.1, por ejemplo, muestra una serie de etiquetas que podrían definir la información temática correspondiente a un elemento de señalización vertical. En ella aparecen etiquetas que definen la carretera en la que está la señal, el tipo de elemento de señalización que es, el nombre de la señal concreta, el código y grupo que le asigna la norma «*Señalización Vertical*», el punto kilométrico en el que está situada, el sentido de circulación, el lado de la carretera y la definición extendida. Este conjunto de etiquetas, junto con la geometría de un *Node*, definirían completamente el elemento en el inventario.

El etiquetado permite una gestión sencilla y eficiente de las búsquedas de

KEY	VALUE
Carretera	N-320
Elemento	Señalización vertical
Nombre	Intersección con prioridad
Código	P-1
Grupo	Advertencia de peligro
PK	13+500
Sentido	Ascendente
Situación	Derecha
Definición	Peligro por la proximidad de una intersección con una vía, cuyos usuarios deben ceder el paso

Fig. 4.1: *Ejemplo de etiquetado para un elemento de señalización vertical*

elementos concretos en la base de datos. Se podría hacer una búsqueda, por ejemplo, de todos los elementos cuya etiqueta «Carretera» tenga un valor «N-320» y cuya etiqueta «Elemento» tenga de valor «Señalización vertical», con lo que se obtendría un listado de todos los elementos de señalización vertical de la carretera N-320. Cualquier otro tipo de búsqueda, restringiendo o ampliando los criterios, es posible.

El mecanismo de etiquetas permite la reutilización de la información por parte de diferentes agentes interesados en un inventario ya existente. Si el contratista encargado de la conservación de la carretera dispusiera ya del inventario del ejemplo de la figura 4.1 y estuviera interesado en añadir a los elementos de señalización vertical la información correspondiente a la empresa que suministra dichos elementos, no tendría más que añadir una etiqueta a cada elemento con dicha información, por ejemplo «Suministro=Empresa Suministradora S.A.». A partir de ahí, el contratista podría realizar búsquedas en la base de datos basadas en el nuevo esquema de etiquetado de los elementos.

Otro ejemplo podría ser el caso de un inventario de calles de un municipio. Las calles estarían reflejadas en el inventario mediante geometrías tipo línea, y cada una de ellas llevaría el etiquetado que hubieran considerado adecuado las autoridades municipales. Si los servicios de emergencias quisieran reutilizar dicho inventario ya existente, pero necesitaran añadir una variable a cada calle que indicase el ancho mínimo de la misma, a efectos de identificar si pueden acceder con determinados camiones de extinción, no tendrían más que añadir a los elementos de las calles la etiqueta correspondiente, pudiendo reutilizar todo el resto de información del inventario municipal. Por ejemplo, podrían añadir una

etiqueta «Ancho_Mínimo = 3,70». El resultado podría ser el de la figura 4.2.

KEY	VALUE
Nombre	Calle de la Paz
Distrito	12
Ancho_Mínimo	3.70

Fig. 4.2: Ejemplo de etiquetado para un elemento calle de un inventario de un municipio

La codificación XML de los elementos *tag* consiste en un elemento XML cuya etiqueta de elemento es «tag» y que tiene dos atributos: el atributo «k» (key) y el atributo «v» (value). La figura 4.3 muestra un ejemplo de una etiqueta codificada en XML.

Fig. 4.3: Ejemplo de elemento tag codificado en XML

```
<tag k="Carretera" v="N-320" />
```

El procedimiento de etiquetado de los elementos individuales proporciona un sistema muy flexible de gestión de la información. Las etiquetas se guardan en unas tablas específicas de la base de datos general. Hay tres tablas: una para las etiquetas de los *Nodes*, otra para las etiquetas de los *Ways* y una tercera para las etiquetas de las *Relations*. En dichas tablas, cada registro está compuesto por la clave y valor de una etiqueta, junto con el identificador de la primitiva geométrica a la que pertenece.

Los programas comerciales para inventarios de carreteras y los modelos de datos estándares que se han descrito en el estado del arte, utilizan bases de datos relacionales. En estas bases de datos, la información se organiza en tablas de elementos de un mismo tipo. Cada tabla tiene una serie de columnas que definen los atributos que deben de tener los elementos de ese tipo. Dichos atributos son fijos para un mismo tipo de elementos. En el ejemplo de la figura 4.1, la tabla de elementos de señalización vertical tendría las columnas correspondientes al etiquetado inicial que aparece en la figura. No sería posible añadir el nuevo atributo «suministrador» que necesita el usuario subcontratista, sin añadir una nueva columna a la tabla, o una nueva tabla a la base de datos. Eso supone un complicado proceso de programación y adaptación de la base de datos. Un razonamiento similar se podría hacer con el ejemplo de la figura 4.2

correspondiente al inventarios de calles de un municipio y la necesidad de los servicios de emergencias de añadir nuevas variables a los datos ya existentes en la base de datos.

En esta tesis se propone un esquema de etiquetado de elementos individuales que no presupone qué etiquetas debe incorporar cada elemento de la base de datos. Cada elemento puede incorporar las etiquetas que se estime conveniente. Los distintos tipos de elementos se clasifican en función de que contengan determinada etiqueta con determinado valor, pero cada uno de ellos puede tener más o menos etiquetas, en función de las necesidades que vayan surgiendo. Esta forma de organizar la información en la base de datos es lo que se ha denominado en la introducción como «*base de datos No-SQL*», que es la denominación con la que se conoce a este tipo de bases de datos, aunque una denominación más correcta sería la de «*bases de datos no-relacionales*».

4.2.2 Elementos *Node*

Los «*Node*» son una de las primitivas geométricas del modelo de datos. Se utilizan para representar elementos de la realidad cuya geometría se pueda asimilar a la de un punto. Cada *Node* tiene asignado un número entero denominado «*id*», que permite su identificación de manera única la base de datos.

Fig. 4.4: Ejemplo de elemento tipo *Node* en codificación XML

```
<node id="25496583" lat="51.5173639" lon="-0.1400430" >
  <tag k="Carretera" v="N-320" />
  <tag k="Elemento" v="Señalización vertical"/>
  <tag k="Nombre" v="Intersección con prioridad"/>
  <tag k="Código" v="P-1"/>
  <tag k="PK" v="13+0500"/>
/>
```

Los *Node* son los únicos elementos de la base de datos que tienen coordenadas. Cada *Node* tiene dos atributos denominados «*lon*» y «*lat*», cuyos valores son la longitud y la latitud geográficas del punto, en el sistema de referencia WGS84 (*World Geodetic Survey 1984*). Las coordenadas longitud y latitud se guardan en la base de datos con una precisión de siete decimales, lo que equivale, en el Ecuador, a una precisión de un centímetro, aproximadamente. Estas coordenadas definen la información espacial del elemento.

Fig. 4.5: Ejemplo de elemento tipo *Node* en codificación OSM-XML

```

<node id="25496583" lat="51.5173639" lon="-0.1400430"
version="1" changeset="203496" user="80n" uid="1238"
visible="true" timestamp="2007-01-28T11:40:26Z">
<tag k="Carretera" v="N-320" />
<tag k="Elemento" v="Señalización vertical"/>
<tag k="Nombre" v="Intersección con prioridad"/>
<tag k="Código" v="P-1"/>
<tag k="PK" v="13+0500"/>
/>

```

La base de datos guarda otros atributos para cada *Node* como son la fecha de la última actualización, la identificación del usuario que realizó dicha actualización y la versión del *Node*. Este último atributo se incrementa en una unidad cada vez que el elemento sufre una modificación. Estos atributos constituyen los metadatos del *Node*. Estos metadatos podrían no ser necesarios en aplicaciones del modelo para inventarios de carreteras, pero habrá que conservarlos si se quiere mantener la compatibilidad del inventario con *OpenStreetMap*, a fin de poder utilizar las herramientas de software disponible.

Cada *Node* incorpora una lista de etiquetas, que son las que definen la información temática del elemento y lo dotan de significado conceptual.

El listado que aparece en la figura 4.4 muestra un ejemplo de elemento *Node* en codificación OSM-XML que podría corresponder a un elemento de señalización vertical de la carretera «N-320» situado en el punto kilométrico 13 + 0500. En el listado de la figura 4.5 se muestra el mismo elemento pero con todos los atributos que sería necesario incluir para mantener la compatibilidad con la base de datos y las herramientas de *OpenStreetMap*.

4.2.3 Elementos *Way*

La primitiva geométrica «*Way*» se utiliza para representar elementos de la realidad cuya geometría se pueda asimilar a una línea. Al igual que sucede con los elementos *Node*, cada línea tiene un número entero, «*id*», que la identifica de manera única en la base de datos. La tabla de la base de datos donde se guardan los elementos del tipo *way* es diferente de la tabla donde se guardan los elementos tipo *node*, por lo que los números enteros que identifican a unos y otros pueden coincidir. Es decir, puede haber un elemento *node* que tenga el mismo número «*id*» que un

elemento *way*. Los elementos quedan identificados de manera única mediante el número entero «*id*» que les corresponde más el tipo de elemento del que se trata.

Las líneas *way* no tienen coordenadas. Lo que tienen es la lista ordenada de los elementos *node* que componen la línea. Estos *nodes* se identifican mediante su identificador «*id*».

Cada línea puede incorporar una lista con un número indeterminado de etiquetas, *tags*, que completen su geometría con la información temática correspondiente, y doten de significado a la línea dentro del inventario. Así una geometría línea puede corresponder a una carretera o a una marca de señalización horizontal, por ejemplo. La geometría se describe igual, mediante la lista de *nodes* que componen la línea. Serán las etiquetas las que indiquen de qué tipo de elemento del inventario se trata.

Los elementos *way* pueden representar tanto líneas abiertas como líneas cerradas. Un elemento *way* representará una línea cerrada, cuando el último elemento de su lista de *nodes* coincida con el primero. Un ejemplo de línea cerrada podría ser una glorieta o también el perímetro de una zona de aparcamiento.

En el listado de la figura 4.6 se ha codificado en XML un ejemplo de elemento *way*, que podría corresponder a determinado tramo de una carretera. Se puede observar que el elemento *way* incluye la lista ordenada de los *nodes* que la componen, que son los que definen su geometría. Los elementos *node* aparecen en la codificación OSM-XML con la etiqueta «*nd*». En el listado del ejemplo se han puesto sólo unos cuantos, una línea real podría tener decenas, cientos o incluso miles de elementos *nd*. En el listado se puede observar que, además de la lista de *nodes*, aparece la lista de etiquetas, *tags*, que determinan la información temática del elemento *way* y describen el elemento conceptualmente. Obsérvese que cada *node* se identifica mediante el identificador «*id*» que tiene en la base de datos, por lo que para «dibujar» un elemento *way* habrá que proceder en dos pasos: primero recuperar de la base de datos el elemento *way* y luego recuperar los *nodes* correspondientes que son los que tienen las coordenadas. Nótese también que cada *node* que forma parte de una línea tendrá su propia lista de etiquetas con información temática que puede complementar a la de la línea. Por ejemplo, cada *node* podría tener una etiqueta que definiera su altitud que podría servir para definir el perfil longitudinal del elemento *way*, como se explicará más adelante.

Al igual que sucedía con los elementos *node*, la codificación OSM-XML añade varios atributos con metadatos a cada elemento *way*: fecha de la última modificación, usuario que ha hecho dicha modificación y versión del elemento. En el caso de querer conservar la compatibilidad con *OpenStreetMap* sería necesario conservar dichos atributos en los elementos *way* que se añadan a la base de datos

Fig. 4.6: Ejemplo de elemento tipo *Way* en codificación XML

```

<way id="34497521">
  <nd id="6534211" />
  <nd id="6534212" />
  ... (aquí iría la lista de completa de nodes)
  <nd id="6534213" />
  <nd id="6534214" />
  <tag k="Carretera" v="N-320" />
  <tag k="Carriles" v="2" />
  <tag k="Sentido único" v="No" />
/>

```

del inventario.

4.2.4 Elementos *Relation*

Los elementos *Relation* son el mecanismo que permite ampliar las funcionalidades del modelo básico. Mediante elementos *Relation* se pueden modelizar geometrías complejas, relaciones topológicas y otros tipos de elementos.

Un elemento *Relation* es una lista de elementos *Node*, *Way* y otros elementos *Relation*. Cada elemento de la lista tiene un atributo denominado «*role*» que especifica el papel que juega el elemento dentro de la relación. Además, cada *Relation* incorpora una lista de etiquetas que definan su información temática.

La codificación de los elementos *Relation* utiliza un elemento XML de nombre «*member*» para cada elemento del tipo *Node*, *Way* o *Relation* que forma parte de la relación. Cada «*member*» tiene tres atributos:

- «*type*»: que describe el tipo del elemento componente de la relación y que puede ser *node*, *way* o *relation*
- «*id*»: que indica el valor del identificador de dicho miembro en la base de datos
- «*role*»: que detalla el papel que dicho elemento juega dentro de la relación

Un ejemplo de geometrías complejas que se pueden definir mediante elementos *Relation* son las geometrías «*multi*» de la norma ISO 19125: los «*MultiPoint*», las «*MultiLine*» y los «*MultiPolygon*» (*International Organization for Standardization*, 2004a). Se trata de geometrías compuestas por más de un elemento del tipo especificado. Por ejemplo, una *MultiLine* puede servir para definir la salida del cálculo de un programa de rutas óptimas que ofrece como resultado una ruta compuesta por fragmentos de líneas diferentes. Pero también se puede

Fig. 4.7: Ejemplo de un elemento *Relation* que define un *MultiPolygon* que representa una superficie con dos huecos (OpenStreetMap, 2013)

utilizar para líneas de gran longitud que estén divididas en varios elementos *way* individuales. Este último caso podría corresponder a una carretera nacional en la que el tramo comprendido dentro de cada provincia está almacenado en la base de datos como un elemento *way* independiente. Un elemento *Relation* con la lista de todos los elementos *way* correspondientes a cada tramo de la carretera proporcionaría la carretera completa.

Los *MultiPolygon* también pueden ser útiles en el inventariado de carreteras. Por ejemplo, un *MultiPolygon* podría representar determinada finca afectada por las expropiaciones de la carretera que ha quedado dividida en dos polígonos disjuntos separados por la carretera.

Un ejemplo de elemento *Relation* muy utilizado son las superficies con huecos, que corresponden a geometrías *MultiPolygon* en las que algunas de las líneas representan los perímetros exteriores de la superficies y otras líneas representan el perímetro de los huecos. En estos casos, se puede asignar un «ROLE = OUTER» a los elementos *way* que componen los perímetros exteriores de la superficie, y un «ROLE = INNER» a los elementos *way* que delimitan los huecos. La figura 4.7 muestra un ejemplo de una superficie con dos huecos resuelta mediante un elemento *Relation*. El listado que se muestra en la parte izquierda de la figura 4.7 muestra la codificación XML. Se trata de la definición de una geometría *MultiPolygon*, formada por un polígono que tiene dos huecos. La etiqueta de clave *type* define la relación como un *MultiPolygon*. La lista de miembros de la relación está formada por tres elementos *Way*. En el atributo *role* de cada uno se especifica si es «outer», para la línea que define el perímetro exterior, o «inner», para las líneas que definen los huecos.

En el apartado dedicado a los elementos *way* se indicaba que, para dibujar el

elemento, hay que proceder en dos pasos: primero coger el *way* de la base de datos y luego coger los *nodes* que lo forman, que son los que tienen las coordenadas. En el caso de los elementos *Relation*, cuando estén formados de elementos *way*, como sucede en muchas ocasiones, para dibujarlos hay que proceder en tres pasos: primero coger el elemento *Relation*, luego coger los elementos *way* que lo forman y por último coger los elementos *node* de cada *way*.

Los elementos *Relation* permiten definir extensiones del modelo básico de datos y es la técnica que se utiliza en esta tesis para definir elementos específicos que permiten crear un modelo de datos utilizable para inventarios de carreteras. En concreto se utilizarán elementos *Relation* para definir la *Referencia Lineal*, la *Segmentación Dinámica*, y las geometrías del trazado en planta y del perfil longitudinal de las carreteras.

4.3 BASE DE DATOS MÍNIMA

Una de las ventajas del modelo es que la estructura de la base de datos requiere muy pocas tablas, cada una de ellas con pocos campos. Esta es una de las características que hacen que el proceso de aprendizaje sea muy sencillo. En la figura 4.8 se muestra la estructura de una base de datos mínima que podría servir para implementar el modelo. Consta de ocho tablas:

1. Tabla para los elementos *Node*. Debe contener campos para el *Id*, la longitud y la latitud.
2. Tabla para las etiquetas de los elementos *Node*. Los campos serán el *Id* del nodo al que pertenece la etiqueta, la clave y el valor.
3. Tabla para los elementos *Way*. Solo se necesita un campo con el *Id* del elemento.
4. Tabla para las etiquetas de los elementos *Way*. Los campos serán el *Id* del *Way* al que pertenece la etiqueta, la clave y el valor.
5. Tabla para los *Node* que forman parte de los elementos *Way*. Necesita campos para el *Id* del elemento *Way* al que pertenece el *Node*, el *Id* del *Node* y el número de orden que ocupa el *Node* dentro del *Way*.
6. Tabla para los elementos *Relation*. Solo necesita un campo con el *Id* del elemento.
7. Tabla para las etiquetas de los elementos *Relation*. Los campos serán el *Id* del *Relation* al que pertenece la etiqueta, la clave y el valor.
8. Tabla para los miembros de los elementos *Relation*. Necesita campos para el *Id* del elemento *Relation*, el tipo de elemento (*Node*, *Way* o *Relation*), el *Id* del elemento miembro y el *Role* que desempeña dentro de la relación.

Fig. 4.8: Estructura de la base de datos mínima para implementar el modelo de datos

Por supuesto, esta estructura se podrá completar añadiendo a cada tabla los campos de metadatos que se consideren necesarios o, incluso, añadiendo tablas adicionales que completen la información que se quiera gestionar en el inventario concreto que se esté confeccionando. Además, si se quiere mantener la compatibilidad con la base de datos de OpenStreetMap, habría que añadir a cada una de estas tablas los metadatos que se han indicado al describir los elementos *Node*, *Way* y *Relation* en apartados anteriores.

4.4 REFERENCIA LINEAL

Como se ha explicado en el capítulo 2, la «*Referencia lineal*» es un sistema de referencia muy utilizado en carreteras, ferrocarriles y otras infraestructuras lineales para especificar la posición de determinados elementos. Se detallan a continuación las distintas maneras de implementar un sistema de referencia lineal utilizando el modelo de datos para inventarios de carreteras propuesto en esta tesis.

4.4.1 La línea de referencia

La línea de referencia puede estar compuesta de un único elemento *way* o de varios. Es conveniente definir siempre un elemento específico del tipo *Relation* para definir la línea de referencia. Dentro del elemento *Relation* se incluirán los elementos *way* que formen la línea de referencia, aunque sólo fuera uno.

El elemento *Relation* correspondiente a una línea de referencia tiene que incluir una etiqueta que lo identifique como línea de referencia. Se podría utilizar una

Fig. 4.9: Ejemplo básico de elemento *Relation* utilizado para definir una línea de referencia

```

<relation id="347">
  <tag k="Route" v="N-320" />
  <member type="way" id="157" role="1" />
  <member type="way" id="158" role="2" />
/>

```

etiqueta de clave «*Locating Feature*», por seguir estrictamente la terminología de la ISO 19148, pero en esta tesis se ha preferido utilizar en los ejemplos la denominación «*Route*», que tiene un uso bastante extendido en entornos SIG para este tipo de situaciones.

El listado de la figura 4.9 muestra un ejemplo de un elemento *Relation* que podría servir para definir la línea del eje de determinada carretera. Como se ve en el listado, la carretera está formada por dos elementos del tipo *way*. Además lleva una etiqueta «*ROUTE = 347*» que sirve para identificar la relación como línea de referencia, y para dotarla de un identificador que la distinga de otras líneas de referencia de la base de datos.

Otra posibilidad es mantener el criterio de que todos los elementos *Relation* de la base de datos lleven una etiqueta de clave «*type*» que especifique el tipo de elemento *Relation* de que se trata. En el caso de seguir este criterio se necesitarían dos etiquetas para definir las líneas de referencia: una etiqueta con la clave «*type*» y el valor «*Route*» y otra etiqueta con la clave «*ref*», por ejemplo, y el valor del nombre o la identificación que se quiera asignar a dicha línea de referencia. El listado de la figura 4.10 muestra el ejemplo del listado de la figura 4.9, pero resuelto con esta segunda solución de etiquetado. Cualquiera de las dos opciones de etiquetado es eficiente, si bien esta segunda de imponer la disciplina de asignar siempre un «tipo» a los elementos *Relation* puede proporcionar algunas ventajas adicionales. En el resto de ejemplos que se muestren a lo largo de la tesis se utilizará esta segunda solución de etiquetado.

Otro detalle de los dos ejemplos de los listados de las figuras 4.9 y 4.10, es que a los miembros *way* de la relación se les ha asignado un *role* numérico, queriendo indicar en qué orden hay que tomar las líneas para componer la *Route*. En realidad, podría no ser necesario, si se utiliza el criterio de que las líneas que componen la *Route* hay que considerarlas en el orden en el que aparecen en el elemento *Relation*.

Para completar la línea de referencia es necesario definir el elemento *Node* en el

Fig. 4.10: Ejemplo de etiquetado alternativo para definir una línea de referencia mediante un elemento *Relation*

```
<relation id="347">
  <tag k="type" v="Route" />
  <tag k="ref" v="N-320" />
  <member type="way" id="157" role="1" />
  <member type="way" id="158" role="2" />
/>
```

que está situado el origen del tramo, si la referenciación se va a especificar mediante distancias absolutas a dicho origen, o los elementos *Node* en los que están situados los hitos kilométricos.

Cuando se quiera utilizar el método de distancias absolutas al origen del tramo, puede ser conveniente incluir el *node* origen dentro del elemento *Relation* que define la línea de referencia. En el listado de la figura 4.11 se muestra la codificación de la línea de referencia utilizada en los ejemplos anteriores, a la que se ha añadido un «*member*» del tipo *Node* cuyo «*role*» es el de «*origen*». Se podrían idear otros esquemas de etiquetado que no exigieran incluir el origen de la línea *Route* en el elemento *Relation*.

Fig. 4.11: Ejemplo de *Route* incluyendo el *Node* origen del tramo, para referenciación lineal mediante distancias absolutas

]

```
<relation id="347">
  <tag k="type" v="Route" />
  <tag k="ref" v="N-320" />
  <member type="node" id="17235" role="origen" />
  <member type="way" id="157" role="1" />
  <member type="way" id="158" role="2" />
/>
```

En los casos en los que se quieran utilizar distancias relativas a los hitos kilométricos, se puede optar por incluir en el elemento *Relation* la lista de *nodes* de los hitos o bien, etiquetar directamente los *Nodes* correspondientes. En el listado de la figura 4.12 se muestra un ejemplo de la primera solución. Se sobrentiende que un caso real incluiría en el elemento *Relation* una lista de decenas o incluso cientos de miembros «*PK*».

Por su parte, el listado de la figura 4.13, muestra el ejemplo de un elemento

Fig. 4.12: Ejemplo de *Route* incluyendo como miembros los *Nodes* correspondientes a los hitos kilométricos

```
<relation id="347">
  <tag k="type" v="Route" />
  <tag k="ref" v="N-320" />
  <member type="way" id="157" role="1" />
  <member type="way" id="158" role="2" />
  <member type="node" id="17235" role="PK-0" />
  <member type="node" id="17948" role="PK-1" />
/>
```

Node con las etiquetas que serían necesarias para definirlo como hito kilométrico de una determinada *Route*. Este esquema de etiquetado se podría utilizar cuando se prefiera no incluir los hitos kilométricos dentro del elemento *Relation* que define la línea de referencia *Route*. La identificación se ha hecho mediante dos etiquetas: una de clave «ROUTE», que designa la línea de referencia a la que pertenece, y otra de clave «HITO-PK», cuyo valor corresponde al del hito kilométrico correspondiente. Se pueden idear para las claves de estas *Etiquetas* otros nombres que les parezcan más adecuados a los creadores de un inventario concreto.

Fig. 4.13: Ejemplo de etiquetado de un *Node* que hace de hito kilométrico de determinada línea de referencia

```
<node id="1347">
  <tag k="Route" v="N-320" />
  <tag k="HitoPK" v="1" />
/>
```

Quizá la forma más adecuada sea definir un elemento *Relation* específico para los hitos kilométricos, que indique a que elemento *Route* pertenecen. El listado de la figura 4.14 muestra esta solución.

Una vez que se han creado elementos *Relation* que definen las líneas de referencia, y el origen del tramo o, en su caso, los *Nodes* de los hitos kilométricos, es posible asignar al resto de elementos de la base de datos su localización mediante referencia lineal, según se explica en los siguientes apartados.

Fig. 4.14: Ejemplo de elemento *Relation* que define un hito kilométrico

```
<relation id="21347">
  <tag k="type" v="PK" />
  <tag k="Route" v="N-320" />
  <tag k="PK" v="1" />
  <node id="1347">
  />
```

4.4.2 Elementos puntuales

Los elementos puntuales estarán representados, en general, por una primitiva geométrica del tipo *Node*. Para establecer su localización mediante referencia lineal se necesita añadir al elemento *Node* dos etiquetas que especifiquen la línea que se utiliza como referencia y la medida de la distancia a lo largo de dicha línea que determina la localización del elemento.

Para definir la línea de referencia respecto de la que se localizan los elementos se puede utilizar una etiqueta de clave «*Route*» y de valor la referencia utilizada en el elemento *Relation* que define dicha línea (ver listado de la figura 4.10).

La distancia a lo largo de la línea de referencia que fija la localización del elemento puntual se puede dar de dos maneras, como se indicó anteriormente. Cuando la posición se fije mediante la distancia absoluta al origen del tramo, se puede añadir al *Node* una etiqueta de clave «*dist*», por ejemplo, o de clave «*distorigen*», si se quiere ser más explícito. El valor numérico de dicha etiqueta será la distancia al origen del tramo en el sistema de unidades que se utilice en el inventario. El listado de la figura 4.15 muestra el ejemplo de una señal de tráfico situada respecto de la línea de referencia del listado de la figura 4.10. Se utiliza la referencia en distancia absoluta para definir su localización. En el listado de la figura 4.15, se han indicado únicamente las etiquetas necesarias para definir la localización del elemento. El elemento incluiría, además, cuantas etiquetas sean necesarias para definirlo completamente.

Cuando la referencia se fije mediante distancias relativas a los hitos kilométricos, se puede resolver con dos etiquetas: una de clave «*ROUTE*», que especifique la línea de referencia, y otra de clave «*PK*», cuyo valor puede indicar el hito kilométrico y la distancia. El listado de la figura 4.16 muestra un ejemplo de esta solución de etiquetado. Se hace notar que los propios hitos kilométricos se podrían resolver con este esquema de etiquetado, sin más que utilizar distancia 0.

Fig. 4.15: Ejemplo de etiquetado de un Node cuya localización se fija mediante distancia absoluta al origen del tramo

```
<node id="1347">
  <tag k="Route" v="N-320" />
  <tag k="DistanciaOrigen" v="12320" />
/>
```

Fig. 4.16: Ejemplo de etiquetado de un Node cuya localización se fija mediante distancia a un hito kilométrico

```
<node id="1347">
  <tag k="Route" v="N-320" />
  <tag k="PK" v="12+0320" />
/>
```

Por último, mencionar que un elemento puntual no tiene por qué tener siempre asociada una geometría *Node*. Podría tratarse de cualquier geometría. Por ejemplo, una estación de servicio podría tener asociada una primitiva geométrica *Way*, o una geometría compleja definida mediante un elemento *Relation*, pero tener asignada la localización mediante referencia lineal a través de un evento puntual. En esos casos la distancia se puede fijar respecto del punto de entrada a la estación de servicio, por ejemplo.

4.4.3 Elementos lineales

Como se indicó en el apartado 2.4.2, la norma ISO 19148 denomina elementos lineales a aquellos que se extienden a lo largo de determinada longitud de la línea de referencia (*Technical Committee ISO/TC 211*, 2012). Podría tratarse de una barrera de contención, o de una marca vial de señalización horizontal, por ejemplo. Se caracterizan por tener un punto de inicio y un punto final. Se pueden resolver, por tanto, mediante un par de etiquetas que indiquen dichos puntos de inicio y de final del elemento, respecto de la línea de referencia. Al igual que sucedía en el caso de los elementos puntuales, dichas distancias pueden estar referidas al origen del tramo o a los hitos kilométricos.

El listado de la figura 4.17 muestra un ejemplo que podría corresponder a una barrera de contención. En este caso se han utilizado distancias respecto del hito kilométrico, que se han definido mediante dos etiquetas de claves «PKINICIO» y

«PKFIN». Por supuesto se podrían idear otros nombres para las claves de las etiquetas. En este ejemplo, una consulta a la base de datos de todos los elementos *Way* cuya etiqueta «ROUTE» tenga el valor «N-320» y tengan una etiqueta «CONTENCION», con valor «Barrera» proporcionaría el listado de todas las barreras de la carretera «N-320» existentes en la base de datos.

Fig. 4.17: Ejemplo de etiquetado de un elemento lineal del tipo *Way* que representa una barrera de contención cuya localización se fija mediante referenciación a los hitos kilométricos

```
<way id="472">
  <tag k="Contencion" v="Barrera" />
  <tag k="Route" v="N-320" />
  <tag k="PKInicio" v="2+0130" />
  <tag k="PKFin" v="2+0330" />
  <tag k="sentido" v="ascendente" />
  <tag k="situacion" v="derecha" />
/>
```

En el caso de querer utilizar distancias absolutas al origen del tramo se podría resolver mediante un esquema de etiquetado similar. El listado de la figura 4.18 muestra un ejemplo de un camino forestal en el que las distancias se dan en valor absoluto al origen del tramo.

Se hace necesario aclarar que en los listados de los ejemplos se utilizan palabras sin acento que en español deberían llevarlo. En listados de lenguajes de programación, nombres de ficheros y otros elementos similares, algunos sistemas operativos dan problemas cuando se utilizan caracteres que no pertenecen al alfabeto inglés. Por ello, en esta tesis se prefiere utilizar el criterio de no acentuar las palabras en ese tipo de elementos computacionales de los listados.

4.5 SEGMENTACIÓN DINÁMICA

Existen propiedades de las carreteras cuyo valor varía a lo largo del recorrido de la misma. Ejemplos de esta situación podrían ser el ancho de la calzada, el número de carriles o el tipo y estado del pavimento.

Se podrían definir elementos independientes de geometría para cada propiedad y para cada tramo en el que varía dicha propiedad, pero es un método poco eficiente, pues se duplican geometrías. La norma ISO 19148 define la técnica que se suele denominar «*Segmentación dinámica*» para resolver dichas situaciones. En realidad

la norma ISO 19148 no la denomina así, sino «*Eventos de atributo*», pero en esta tesis se prefiere utilizar la denominación «*Segmentación dinámica*» por tratarse de una denominación ampliamente extendida para designar a esta técnica (*Technical Committee ISO/TC 211*, 2012).

La forma de resolver la *segmentación dinámica* mediante etiquetas temáticas puede hacerse de manera similar a como se resuelve la referencia de eventos lineales. Como en el resto de casos, habrá que definir la línea de referencia mediante un elemento *Relation* del tipo *Route*. Además habrá que definir elementos *Relation* para cada tramo con un valor homogéneo de la propiedad que se quiere caracterizar y añadir etiquetas adicionales para indicar la propiedad que se está definiendo y el valor que toma en cada tramo.

El listado de la figura 4.18 muestra un ejemplo de dos tramos con diferente anchura de determinado camino forestal. En este ejemplo, una consulta a la base de datos solicitando todos los elementos *Relation* del tipo «*Anchura*» en los que la etiqueta *ROUTE* tenga el valor «*Camino Matarrubia*» proporcionaría el listado de todos los elementos que definen el ancho del camino a lo largo de su recorrido.

Fig. 4.18: Ejemplo de elementos *Relation* para definir el ancho de un camino mediante *segmentación dinámica*

```
<relation id="7247">
  <tag k="Type" v="Anchura" />
  <tag k="Route" v="Camino Matarrubia" />
  <tag k="DistInicio" v="2130" />
  <tag k="DistFin" v="2330" />
  <tag k="ancho" v="3.70" />
/>
<relation id="7248">
  <tag k="Type" v="Anchura" />
  <tag k="Route" v="Camino Matarrubia" />
  <tag k="DistInicio" v="2330" />
  <tag k="DistFin" v="2530" />
  <tag k="ancho" v="2.75" />
/>
```

4.6 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA CARRETERA

Algunos de los estándares y modelos de datos mencionados en el capítulo 2, no disponen de ningún procedimiento para describir la geometría de la carretera. El modelo de datos que se propone en esta tesis doctoral proporciona un

procedimiento para definir y describir las características de las alineaciones (rectas, curvas de transición y curvas circulares), de las rasantes (rampas, pendientes y acuerdos parabólicos) y de la sección transversal de las carreteras.

La descripción de los parámetros de los elementos geométricos que componen la carretera se puede resolver como un caso particular de segmentación dinámica. Se pueden definir elementos *Relation* que describan las características de cada alineación, de cada rasante o de la sección transversal.

4.6.1 Trazado en planta

Cada alineación del trazado en planta necesitará un elemento *Relation* que defina sus parámetros. El elemento *Relation* que define cada alineación necesitará las siguientes etiquetas:

- una etiqueta «TYPE» con el valor «*planta*», que indique que se trata de una alineación del trazado en planta de la carretera
- una etiqueta «ROUTE» que especifique la línea de referencia
- dos etiquetas «PKINICIO» y «PKFIN» que indiquen los puntos de comienzo y final de la alineación
- una etiqueta «ALINEACION» que indique cuál es el tipo de la alineación y que podrá tomar los valores «*Recta*», «*Clotoide*» o «*CurvaCircular*»

En el caso de las alineaciones rectas, no sería necesaria ninguna etiqueta adicional. Las curvas circulares necesitan además una etiqueta «RADIO» que especifique el radio de la curva. Se podría indicar el sentido de giro de la curva incorporando un signo positivos, cuando la curva gire a derechas, o negativo, cuando la curva gire a izquierda, según el sentido creciente del recorrido. Las alineaciones correspondientes a las curvas de transición necesitan una etiqueta adicional «PARAMETRO» con el valor del parámetro de la clotoide. Con estos datos las alineaciones están geométricamente definidas, pero se podrían añadir etiquetas adicionales a las alineaciones con el valor de algunos parámetros ya calculados, por ejemplo el azimut de las rectas, o el azimut de los puntos de entrada y salida de las alineaciones curvas, las coordenadas del centro de las curvas circulares, su retranqueo, u otros que se quiera añadir.

Una forma alternativa de definir el trazado en planta y que puede ser suficiente a los efectos de los inventarios físicos de las carreteras puede ser añadir a cada elemento *Node* una etiqueta que detalle la curvatura de la carretera en dicho punto. Se podría añadir, además, una etiqueta adicional que indique si se trata de un *Node* situado en una recta, en una clotoide o en una curva circular. En el caso de

las clotoides, para que quedasen totalmente definidas necesitarían además una etiqueta adicional con el valor del parámetro de la clotoide, por ejemplo.

4.6.2 Perfil longitudinal

A diferencia del caso del trazado en planta, en el cual las coordenadas de los puntos a lo largo de la línea de referencia son conocidas, pues están en los elementos *Node* que componen la línea, en el caso del perfil longitudinal no tienen por qué ser conocidas las cotas de dichos puntos. Cuando se trabaja con inventarios de carreteras puede ser una buena costumbre añadir a todos los elementos *Node* una etiqueta que proporcione su altitud o cota. Se puede utilizar una etiqueta de clave «ALTITUD» cuyo valor indicará la altitud del punto en el sistema de referencia utilizado. Disponiendo del valor de la altitud en los puntos, se pueden realizar operaciones de análisis espacial sobre el perfil longitudinal de la carretera.

En el caso de que los *Nodes* no tengan el dato de altitud, será necesario añadir esta información en las etiquetas de los elementos *Relation* que definen las distintas alineaciones del perfil longitudinal. Una solución de etiquetado para los elementos *Relation* de las alineaciones del perfil longitudinal, siguiendo este último criterio, podría ser la siguiente:

- una etiqueta «TYPE» con el valor «*perfil*», que indica que se trata de una alineación del perfil longitudinal de la carretera
- una etiqueta «ROUTE» que especifique la línea de referencia
- dos etiquetas «PKINICIO» y «PKFIN» que indiquen los puntos de comienzo y final de la alineación
- una etiqueta «ALINEACION» que indique cuál es el tipo de la alineación y que podrá tomar los valores «*Pendiente*» o «*Acuerdo*»
- dos etiquetas «COTALNICIO» y «COTAFIN» para indicar las cotas en los puntos de entrada y de salida de la alineación, respecto del plano horizontal de referencia
- dos etiquetas «TGINICIO» y «TGFIN» para especificar los ángulos de las tangentes en los puntos de entrada y salida de la alineación

Con estos datos las alineaciones quedan geométricamente definidas, pero en el caso de los acuerdos parabólicos puede ser de utilidad añadir una etiqueta adicional «*ParametroK*» que ofrezca el valor del parámetro K_v del acuerdo.

El listado de la figura 4.19 muestra un ejemplo correspondiente a un acuerdo parabólico convexo que enlaza una rampa y una pendiente de cierta carretera.

Fig. 4.19: Ejemplo de elementos Relation correspondientes a un tramo del perfil longitudinal de una carretera

```
<relation id="1">
  <tag k="Route" v="M-607" />
  <tag k="Type" v="perfil" />
  <tag k="Alineacion" v="Pendiente" />
  <tag k="PKInicio" v="0+0000" />
  <tag k="PKFin" v="1+0373" />
  <tag k="CotaInicio" v="1000.0" />
  <tag k="CotaFin" v="1013.73" />
  <tag k="TgInicio" v="0.01" />
  <tag k="TgFin" v="0.01" />
/>
<relation id="2">
  <tag k="Route" v="M-607" />
  <tag k="Type" v="perfil" />
  <tag k="Alineacion" v="Acuerdo" />
  <tag k="PKInicio" v="1+0373" />
  <tag k="PKFin" v="1+0867" />
  <tag k="CotaInicio" v="1013.73" />
  <tag k="CotaFin" v="1006.26" />
  <tag k="TgInicio" v="0.01" />
  <tag k="TgFin" v="-0.02" />
/>
<relation id="3">
  <tag k="Route" v="M-607" />
  <tag k="Type" v="perfil" />
  <tag k="Alineacion" v="Pendiente" />
  <tag k="PKInicio" v="1+0867" />
  <tag k="PKFin" v="4+0220" />
  <tag k="CotaInicio" v="1006.26" />
  <tag k="CotaFin" v="979.20" />
  <tag k="TgInicio" v="-0.02" />
  <tag k="TgFin" v="-0.02" />
/>
```

Tanto el trazado en planta como el perfil longitudinal de una carretera están formados por numerosas alineaciones, cada una de ellas con varios parámetros. La confección manual de los etiquetados de las alineaciones sería un trabajo demasiado arduo. Este trabajo debe corresponder a los programas de trazado o de reconstrucción de la geometría con los que se esté trabajando, que serán los encargados de generar los listados de alineaciones con sus etiquetados. En el caso del programa de reconstrucción del perfil longitudinal de una carretera a partir de los datos de las pendientes, que se presenta en el capítulo 5 de esta tesis, una

de las opciones del programa es la generación del listado de elementos *Relation* que definen el perfil longitudinal y que podría incorporarse a un inventario en el que se estuviera trabajando.

4.6.3 Sección transversal

La sección transversal de la carretera se puede definir mediante las etiquetas con los valores que interesen al usuario del inventario. Habrá usuarios que sólo estén interesados en la anchura total de la vía, como en el caso del camino forestal del listado de la figura 4.18 y habrá usuarios, en cambio, interesados en la descripción completa de la sección transversal con sus pendientes transversales, número de carriles, su anchura y cualquier otro parámetro que se quiera definir.

En la figura 4.20, se muestran las variables que utiliza el inventario de carreteras nacionales del año 2008 para definir la sección transversal de las carreteras. Una etiqueta con el nombre y valor de las variables que se quieran gestionar en el inventario resolverá la definición de las secciones.

En el caso de que el valor de las variables sea el mismo para toda la carretera, se podrá añadir esta información directamente a la línea, *Way* o *Relation*, que defina la misma. En el caso de que los parámetros tomen distintos valores en diferentes secciones de la carretera a lo largo de su recorrido, habrá que definir elementos *Relation* con la segmentación dinámica de la carretera en función del valor de dichos parámetros.

4.6.4 Firmes, visibilidad, gálibo y otras variables

Los tipos de firmes se pueden definir mediante una etiqueta de clave FIRME y valor el que le corresponda: aglomerado, hormigón, adoquinado u otros. En el caso de que el tipo de firme sea el mismo a lo largo de toda la carretera, bastará con añadir dicha etiqueta al elemento *Way* o al elemento *Relation* que represente a la carretera. En los casos en los que el tipo de firme varíe a lo largo del recorrido, habrá que utilizar elementos *Relation* con la segmentación dinámica que defina dichas variaciones.

La visibilidad de los tramos se puede definir también mediante segmentación dinámica, definiendo unos elementos *Relation* cuya etiqueta TYPE tenga de valor *Visibilidad* y con etiquetas adicionales, por ejemplo, para las visibilidades de parada y de adelantamiento.

La velocidad máxima permitida en cada tramo es otro valor que se presta a la utilización de la segmentación dinámica de toda la carretera para definirla.

Fig. 4.20: Variables que definen la sección en una carretera (Ministerio de Fomento, 2009c)

Hay otras variables que puede interesar definir en un inventario, por ejemplo para definir las estructuras, o las condiciones de gálibo en algunas secciones. La combinación adecuada de las técnicas de etiquetado que se han explicado en los apartados anteriores resolverán cada caso.

El gálibo de paso en determinadas estructuras se puede definir mediante la segmentación dinámica de toda la carretera, con los valores de los distintos gálbos en cada tramo, o definiendo dichos valores sólo en las secciones de la carretera en los que los gálbos estén restringidos. Esta es la solución que se ha utilizado en el listado de la parte izquierda de la figura 4.21, para definir la limitación de altura bajo el paso elevado de la parte derecha de la figura. Una petición a la base de datos con todas las *Relation* de la «ROUTE = N-320», del tipo «GALIBO», daría el listado de todas las secciones de la carretera donde haya alguna restricción de gálibo.

Otro caso que se puede resolver mediante segmentación dinámica es el de la descripción del terreno adyacente a la carretera, indicando si se trata de terreno en desmonte, en media ladera, en terraplén, llano, con edificaciones u otros.

```

<relation id="7312">
  <tag k="type" v="Galibo" />
  <tag k="Route" v="N-320" />
  <tag k="PK" v="112+0100" />
  <tag k='AlturaMax' v='3.40' />
/>

```

Fig. 4.21: *Ejemplo de etiquetado en una sección con la altura máxima limitada*

4.7 VARIACIÓN DINÁMICA Y UTILIZACIÓN DE VARIOS IDIOMAS

En otros apartados de esta tesis se ha comentado que una de las cuestiones que no están correctamente resueltas en los procedimientos actuales de realización de inventarios es la variación dinámica rápida de las condiciones de las carreteras. Se ha mencionado el caso de los inventarios tras catástrofes, en los que la posibilidad de circular por los diferentes tramos varía a medida que avanzan las tareas de reconstrucción. Pero esa misma situación de variabilidad en las condiciones de circulación se da en situaciones normales de explotación de las carreteras convencionales, motivadas por la congestión del tráfico, la realización de obras o la disposición de desvíos provisionales por accidentes u otros motivos.

Al igual que sucedía con otros tipos de variables, habrá casos que se resuelvan mediante eventos puntuales, por ejemplo informar de la existencia de un accidente en un punto kilométrico concreto. Otros casos se prestarán más a su definición mediante eventos lineales, por ejemplo la reducción en el número de carriles en una autopista debido a un tramo en obras. Otros casos requerirán la segmentación lineal de toda la carretera, por ejemplo el estado de circulación definido mediante algún índice (despejado, congestión,...) o mediante un valor objetivo (velocidad media de circulación en el tramo).

La publicación continua a través de la *Web* de todos estos valores, puede permitir a los agentes interesados utilizar dicha información en programas navegadores, cálculo de rutas para transportistas u otros tipos de software. El sistema propuesto de etiquetado es sencillo de implementar, tanto para las autoridades que tengan que ofrecer los servicios web de consulta, como para los programas que quieran acceder a dichos servicios web para utilizar la información

disponible en directo. Hay que indicar que dichos valores ya se están publicando, pero en distintos formatos para cada parámetro, lo que dificulta su consulta por parte de los agentes interesados. La utilización de un formato unificado, basado en el modelo de datos que se propone en la tesis, sería una solución más eficiente que la actual.

Otra de las ventajas del modelo de datos que se propone es que permite la utilización de manera simultánea de varios idiomas para describir los elementos. Esto se puede conseguir sin más que añadir a la clave de la etiqueta correspondiente la abreviatura del idioma en el que está expresado el valor del atributo. El nombre de la clave y la abreviatura del idioma se separarán por dos puntos. La figura 4.22 muestra un ejemplo tomado de la base de datos de *OpenStreetMap* correspondiente a un elemento *Way* de una calle en Israel etiquetado en varios idiomas.

```
<way id="41981947">
  <nd ref="410603523"/>
  <nd ref="4323929579"/>
  <nd ref="1163013710"/>
  <nd ref="1163013351"/>
  <tag k="highway" v="secondary"/>
  <tag k="maxspeed" v="70"/>
  <tag k="name" v="שדרות מנחם בגין"/>
  <tag k="name:ar" v="مناحيم بيغن"/>
  <tag k="name:en" v="Menahem Begin Avenue"/>
  <tag k="name:en1" v="Sderot Menahem Begin"/>
  <tag k="name:en2" v="Menahem Begin"/>
  <tag k="name:en3" v="Menahem Begin Blvd."/>
  <tag k="name:en4" v="Sderot Menachem Begin"/>
  <tag k="name:en5" v="Begin Avenue"/>
  <tag k="name:he" v="שדרות מנחם בגין"/>
  <tag k="name:he1" v="מנחם בגין"/>
  <tag k="name:he2" v="בגין"/>
  <tag k="name:he3" v="שדרות בגין"/>
  <tag k="name:ru" v="Менахема Бегина"/>
  <tag k="name:es" v="Avenida Menahem Begin"/>
  <tag k="oneway" v="yes"/>
</way>
```

Fig. 4.22: Ejemplo de elemento *Way* etiquetado en varios idiomas (Coast, 2004)

4.8 METODOLOGÍA INCREMENTAL PARA REALIZACIÓN DE INVENTARIOS

Como se ha indicado anteriormente, el primer paso para realizar un inventario es su diseño y planificación. Mediante el método de inventariado que se propone en esta tesis el diseño puede ser mínimo, limitándose al establecimiento de unos objetivos generales que incluyan una lista de algunas de las variables que se quiere inventariar.

Los datos que se utilizan para la preparación de los inventarios pueden proceder de diferentes fuentes. Algunos de estos datos ya existirán antes de la realización del inventario: bases de datos, fotografías aéreas y de satélites, cartografía y otras informaciones SIG, hojas de cálculo y documentos de texto con listas de elementos, georreferenciados o no, etc.

Actualmente existen fotografías de satélite de todo el planeta con resoluciones que pueden distinguir la traza de las carreteras y los caminos. También existe información vectorial de las carreteras de muchos lugares del planeta. Esta información se puede utilizar para disponer de una primera aproximación de las geometrías de las vías que se pretende inventariar.

También es habitual disponer de hojas de cálculo y documentos de texto que detallan listas de los elementos que se pretende inventariar. Dichas listas de elementos pueden proporcionar las coordenadas de los mismos en determinado sistema de referencia o no, según los casos.

En cualquier caso, toda la información de que se disponga, procedente de las distintas fuentes, habrá que procesarla para georreferenciarla adecuadamente, realizar las transformaciones necesarias de las coordenadas al sistema de referencia que se vaya a utilizar en el inventario y convertirla a formatos vectoriales SIG, de forma que se puedan hacer operaciones de análisis espacial sobre ellas utilizando herramientas SIG (ver figura 4.23).

Para obtener una geometría más precisa y poder establecer con exactitud el estado de las carreteras y de sus elementos, es necesario grabar el vídeo de su recorrido y registrar la traza con dispositivos GNSS. A partir de los datos recogidos con los dispositivos GNSS será posible calcular la traza del eje de la carretera. El procedimiento más sencillo, en carreteras de doble sentido y una sola calzada, es recoger dos trazas, una en cada sentido de recorrido, y calcular la línea de puntos medios. Es el procedimiento que se ha seguido en los ensayos presentados en el capítulo 3 (*Castro et al.*, 2006).

Los mismos dispositivos GNSS se pueden utilizar para registrar la localización

Fig. 4.23: Fuentes de datos y esquema del procesado de la información

absoluta de otros elementos de las carreteras que se quiera inventariar, por ejemplo las estructuras o los elementos de señalización. La información temática correspondiente a los distintos elementos se puede anotar en cuadernos de campo o mediante la utilización de grabadoras de voz o de aplicaciones utilitarias para teléfonos móviles o tabletas que proporcionen notas de voz georreferenciadas, como la aplicación *RoadRecorder* desarrollada en esta tesis o *Geopaparazzi*, comentada en el capítulo 2. El recorrido de la carretera también es útil para comprobar si la información de la que se disponía previamente es correcta y está actualizada. Sirva de ejemplo las modificaciones de trazado respecto de los datos de proyecto disponibles detectadas en la carretera M-607 y que se comentan en los ensayos del capítulo 3.

Una vez que se ha recogido toda la información, es necesario convertirla a formatos vectoriales SIG, como se ha mencionado y se muestra en la figura 4.23. En la mayoría de los casos se podrán utilizar programas SIG de escritorio. El resultado final serán una serie de capas vectoriales. El formato *shapefile* puede ser

una buena alternativa en este sentido, como forma de registrar las geometrías de la información espacial de los elementos del inventario.

Para incorporar la información temática siguiendo el modelo de datos propuesto en esta tesis, se puede utilizar la herramienta JOSM (*OpenStreetMap*, 2016). JOSM permite importar las capas *shapefile* con las geometrías, convertir la información al formato OSM, y añadir, editar o modificar el etiquetado de los distintos elementos del inventario. Ofrece ampliaciones muy interesantes de cara a la gestión de la información de los inventarios de carreteras. Merece destacar en este sentido el complemento para gestionar señales de tráfico, que ofrece imágenes y reconoce los códigos de la señalización de muchos países (*OpenStreetMap*, 2015). En cualquier caso, los ficheros *.osm* son ficheros de texto XML que podrían editarse utilizando simplemente un editor de texto, lo que puede facilitar mucho la edición masiva de datos. Este ha sido el procedimiento utilizado en los casos de estudio que se presentan al final de este capítulo.

Lo habitual será disponer de aplicaciones personalizadas, desarrolladas al efecto de la realización de los inventarios utilizando el modelo de datos propuesto. Dichas aplicaciones internamente utilizarán alguna base de datos para almacenar y analizar la información del inventario. Si el motor de base de datos admite operaciones de análisis espacial, se podrán realizar dichas operaciones sobre los datos del inventario. En todos los casos, el formato OSM-XML será el que se utilice para intercambiar información entre las distintas aplicaciones.

Los programas SIG de escritorio también reconocen el formato OSM-XML, por lo que también se podrán utilizar para editar la información del inventario. De estos programas se pueden mencionar, a título de ejemplo, algunos de software libre que proporcionan una opción de buena calidad y a coste de licencias cero, como en el caso de QGIS (*OSGEO: Open Source Geospatial Foundation*, 2002) o gvSIG (*gvSIG*, 2004). Existen numerosas herramientas que permiten realizar el intercambio de información entre los archivos OSM-XML y las bases de datos más habituales. Para inventarios sencillos o para aplicaciones preparadas para funcionar sobre teléfonos móviles se puede utilizar una base de datos ligera, como SQLite. Cualquier lenguaje de programación es capaz de leer y escribir información en bases de datos SQLite (*Hipp*, 2000; *Kumar Aditya and Kumar Karn*, 2014; *Da Rocha*, 2016). Para aplicaciones más complejas se pueden establecer interfaces desde cualquier lenguaje de programación y los motores de bases de datos más habituales, como PostgreSQL (*PostgreSQL Global Development Group*, 1986), Postgis (*Ramsey et al.*, 2001), MySQL (*Axmark et al.*, 1994), ORACLE Database (*Oracle Corporation*, 1977), IBM DB2 (*International Business Machines Corporation*, 1970), o Microsoft SQL Server (*Microsoft*, 1989). Estos software de

bases de datos (a excepción de MySQL) disponen de extensiones espaciales que permitirán la realización de complejas operaciones de análisis espacial sobre los datos.

Por último, indicar que un inventario de carreteras sólo es útil si está debidamente actualizado. En ese sentido, la posibilidad de utilizar numerosas herramientas de software libre para editar la información de los inventarios generados, desde simples editores de texto, hasta programas SIG de escritorio, la herramienta JOSM o los motores de bases de datos, convierten el modelo propuesto en una herramienta fácil de actualizar. De hecho, la mayoría de las actualizaciones se pueden llevar a cabo por parte de personal sin experiencia previa en la elaboración de inventarios de carreteras.

4.9 CASOS DE ESTUDIO

Se ha trabajado sobre seis casos de estudio para mostrar y valorar las posibilidades que ofrece el modelo de datos propuesto en el inventariado de distintos tipos de vías. En primer lugar se realizaron operaciones de inventario sobre un tramo de la carretera M-607 en Madrid. Con ello se muestra en la práctica la forma de resolver distintos aspectos mencionados en apartados anteriores en el caso de las carreteras destinadas a la circulación de automóviles. También se realizó el inventario de un camino forestal. El inventario se realizó contando con la colaboración del servicio de protección civil responsable de la vía, comprobando que se podían cubrir de manera adecuada sus necesidades de información. A continuación se utilizaron datos procedentes de la base de datos de OpenStreetMap correspondientes a dos vías ciclistas, con el fin de comprobar las posibilidades que ofrece el modelo para transformar y reutilizar información preexistente para la realización de un inventario destinado a un uso diferente del original. Un proceso similar se utilizó con datos correspondientes a una línea de autobús, con utilización intensiva de múltiples idiomas y referencia lineal en la que la línea de referencia está compuesta de varias entidades lineales diferentes. Por último, se realizaron operaciones de inventario sobre un tramo del Camino de Santiago, como ejemplo de aplicación del modelo a una vía pedestre.

A excepción del ensayo de inventariado de la carretera M-607 en Madrid, el resto de ensayos corresponden a vías no destinadas al tráfico de automóviles. Habría sido difícil inventariarlas utilizando los estándares existentes, como LanXML, AustroRoads o el esquema de inventariado del Ministerio de Fomento de España. La mayoría de los elementos inventariados en estas vías no están recogidos en ninguno de esos modelos de datos. En cambio, no supuso ninguna

dificultad inventariar dichas vías con el modelo de datos que se propone en esta tesis y que fue posible adaptar a cada caso, mediante el uso de las etiquetas adecuadas para reflejar la información temática necesaria.

Los tramos de vías analizados fueron los siguientes:

- *Carretera M-607 (Madrid)*: caso de estudio del inventariado de una carretera convencional
- *Camino forestal de Matarrubia (Moralzarzal, Madrid)*: caso de estudio del inventario de una vía forestal
- *Vía ciclista en Cambridgeshire (Inglaterra)*: estudio del inventario en una vía ciclista
- *Vía ciclista Sutherland-Tarent Point (Australia)*: otro caso de vía ciclista
- *Línea de autobús número 66 de Ashdod (Israel)*: caso de estudio del inventario en una línea de autobús
- *Tramo del Camino de Santiago (España)*: caso de estudio del inventario de una vía pedestre

En los apartados siguientes se describe cada uno de ellos.

4.9.1 Carretera M-607

El primer caso de estudio de aplicación del modelo de datos propuesto es la carretera M-607 de calzada única y doble sentido de circulación en Madrid (España), que ya ha sido descrita y utilizada en los ensayos del capítulo 3.

4.9.1.1. Toma de datos

Los datos iniciales fueron ortofotos y ficheros en formato *shapefile* de libre acceso procedentes del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica, España). También se descargó desde OpenStreetMap la línea del eje de la carretera en formato OSM-XML. A continuación, se recorrió la carretera en los dos sentidos, mientras se filmaba en vídeo y se grababa la traza GPS utilizando para ello *RoadRecorder* (Higuera de Frutos and Castro, 2014).

4.9.1.2. Procesamiento de los datos

La visualización de los vídeos sincronizados con la posición del móvil sobre la cartografía mediante la aplicación *RoadPlayer* sirvió para inventariar algunos elementos de la carretera, como la señalización vertical, algunas estructuras, el

estado general del pavimento y otros.

Los ficheros *shapefile* procedentes del CNIG junto con las trazas grabadas con *RoadRecorder* se editaron en la aplicación JOSM para añadir etiquetas con la información temática de algunos de los elementos. Se añadieron de esta manera algunas señales de tráfico con su correspondiente información temática.

En la figura 4.24 se muestra la pantalla del programa JOSM con el editor de señales de tráfico abierto, en un momento de la edición de una señal de tráfico de la carretera M-607 de Madrid, durante la resolución del caso de estudio.

Fig. 4.24: Edición de señales de tráfico de la carretera M-607 con el programa JOSM

4.9.1.3. Resultados

El resultado del ensayo se compone de varios ficheros:

- Se creó un proyecto en el programa QGIS que incluye las trazas y una capa de puntos con todos los elementos de inventario en formato *shapefile*. Estas capas están en coordenadas UTM ETRS89 y proyectadas sobre las ortofotografías del PNOA
- Proyecto para el programa *RoadPlayer* con la filmación de los recorridos de la carretera M-607 en los dos sentidos
- Proyecto para el programa JOSM con todos los datos de inventario
- Fichero *.osm* del inventario en el formato propuesto en la tesis.

Toda la información de inventario, en el formato de datos propuesto en la tesis, se grabó en un fichero en formato *.osm*. En el anexo B.1 se detallan algunos ejemplos

de elementos del inventario. El código completo de la capa vectorial *.osm* con los elementos inventariados de la M-607 se puede consultar en el repositorio de los contenidos de la tesis, en la dirección WEB:

<https://github.com/shiguera/tesishiguera>

El listado de la figura 4.25 muestra un fragmento del fichero *.osm* resultante. En el listado aparece en primer lugar el *Node* de ID=2974, con sus coordenadas. A continuación aparece un elemento *Relation* correspondiente al hito kilométrico PK-42. Las etiquetas describen la señal y el elemento *member* indica que las coordenadas se tienen que tomar del nodo 2974. El tercer elemento que aparece en la relación es una señal de *Intersección con prioridad*, con sus coordenadas absolutas, descripción y su referencia lineal respecto del hito kilométrico anterior.

Fig. 4.25: Elementos de inventario de señalización vertical en la M-607

```
<node id='2974' lat='40.685551' lon='−3.821740' />

<relation>
  <tag k='type' v='PK' />
  <tag k='Route' v='M-607' />
  <tag k='PK' v='39' />
  <tag k='señalización' v='Señalización Vertical' />
  <tag k='ref:es' v='PK-1' />
  <tag k='nombre' v='Punto Kilométrico' />
  <tag k='grupo' v='Hitos' />
  <tag k='sentido' v='ascendente' />
  <tag k='situacion' v='derecha' />
  <member type='node' id='2974' role='' />
</relation>

<node id='1008' lat='40.6833786' lon='−3.7946919'>
  <tag k='Route' v='M-607' />
  <tag k='PK' v='39+240' />
  <tag k='señalización' v='Señalización Vertical' />
  <tag k='ref:es' v='P-1c' />
  <tag k='nombre' v='Intersección con prioridad' />
  <tag k='grupo' v='Advertencia de peligro' />
  <tag k='sentido' v='ascendente' />
  <tag k='situacion' v='derecha' />
</node>
```

El tiempo invertido en el inventariado del tramo de la M-607 analizado fue el necesario para recorrerla en ambos sentidos con un automóvil mientras se filmaba

la carretera y unas seis horas de gabinete para extraer los elementos de la carretera mientras se visionaban los vídeos. Toda la cartografía que se utilizó provenía de fuentes públicas de libre disposición y todas las herramientas que se utilizaron eran de software libre.

4.9.2 Camino forestal de Matarrubia

Fig. 4.26: Plano de situación del Camino de Matarrubia que da acceso al cerro de Cabeza Mediana en Morálzarzal

El segundo ensayo es el inventariado de un camino forestal. Se trata del camino forestal de Matarrubia, situado en el término municipal de Morálzarzal, en la provincia de Madrid. El camino tiene unos 4 Km de longitud y asciende desde la periferia del casco urbano hasta el *Cerro de Cabeza Mediana*, también conocido como *Pico del Telégrafo*, por estar situada en su cumbre una edificación que antiguamente se utilizaba como torre de señales ópticas para enlazar la Sierra de Madrid con la Capital. La cota en el arranque es de 970 m y en la coronación de 1331, lo que da lugar a una pendiente media del 9 %. El camino tiene una anchura de 3.5 m y el firme es granular. Sólo se puede circular con vehículos todo-terreno.

El mantenimiento del camino depende de la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid. Ellos son los encargados de la señalización, estado del firme, instalaciones de drenaje y otros elementos.

Fig. 4.27: *Filmación en el camino de Matarrubia. a) Vehículo todo-terreno perteneciente a la agrupación de Protección Civil de Moralarzarzal utilizado para la filmación. b) Detalle de la fijación del teléfono móvil al retrovisor del vehículo.*

4.9.2.1. Toma de datos

Para la toma de datos se contó con la colaboración de la unidad de Protección Civil de Moralarzarzal. Se utilizó una bomba de extinción de incendios todo-terreno para recorrer el camino. Se filmó el recorrido y se grabó la traza GNSS con el programa *RoadRecorder*, en los dos sentidos, de subida y de bajada. El teléfono móvil era un modelo *Nexus 5* y se fijó al espejo retrovisor del vehículo. Además se grabó simultáneamente la traza GNSS con un receptor de bajo coste marca *Garmin* modelo *GPSMap 64S*. Se tomaron fotografías a lo largo del recorrido con una cámara fotográfica *Cannon EOS 600*. En la figura 4.27 se pueden ver dos de estas fotografías: a la izquierda, en primer plano, el vehículo todo-terreno utilizado y, al fondo, la edificación del telégrafo que da nombre al cerro; a la derecha se puede ver un detalle de la fijación del teléfono móvil al retrovisor del vehículo.

Durante el trayecto, se fue conversando con Carlos Salmerón, responsable de protección civil de Moralarzarzal, de manera que quedaran grabadas en *RoadRecorder*, como notas de voz georreferenciadas, sus comentarios acerca de los elementos a inventariar. La medición del ancho del camino se hizo en dos puntos a lo largo del recorrido utilizando un flexómetro manual. El tiempo empleado en la grabación fue de una hora y treinta minutos.

4.9.2.2. Procesamiento de los datos

Se utilizó el programa *RoadPlayer* para visualizar los vídeos de los recorridos y tomar nota de los elementos de inventario y de sus distancias al origen para la referencia lineal de los mismos. Se utilizaron coordenadas geográficas referidas al sistema de referencia WGS84. Se inventariaron los siguientes elementos:

- *Eje del camino*. Se inventarió la traza del camino. El resultado fueron dos elementos tipo *way* que se unieron en un único elemento *Relation* que es el que se utilizó como eje con origen en la primera barrera de acceso. Las distancias a este origen del camino son las que se utilizaron en el resto de elementos inventariados como referencia lineal de su localización
- *Barreras de limitación de accesos*. Las había de dos tipos: levadizas para impedir el paso de vehículos y «*pasos canadienses*» para impedir el paso del ganado.
- *Señalización vertical*. A lo largo del recorrido se encuentran distintas señales, informativas o de prohibición
- *Fuentes*. Se encontraron dos fuentes y dos abrevaderos a lo largo del camino
- *Depósitos de agua*. Se encontraron tres depósitos de agua: uno mayor, al principio del camino, y dos más, aguas abajo de las fuentes, cuya capacidad se estimó en 50 m^3 , a juzgar por las dimensiones exteriores
- *Vértices geodésicos*. Hay dos vértices geodésicos en el recorrido: *El Pinar* y *Prados del Pinar*. Para fijar en el inventario la posición exacta de estos vértices se utilizó la información procedente del Instituto Geográfico Nacional
- *Elementos de drenaje*. El camino dispone de un drenaje longitudinal en uno de los lados. En varios puntos hay una pequeña acequia que atraviesa el camino por debajo. El objetivo es que el agua de escorrentía no deteriore el pavimento, lo que no siempre se consigue (ver figura 4.28b)
- *Construcciones*. Se inventariaron diversas construcciones a lo largo del recorrido, como torres de alta tensión y un molino de agua
- *Comederos y bebederos cinegéticos*. Se trata de pequeñas estructuras destinadas a proporcionar alimento y bebida a diversas especies cinegéticas de la zona y que son mantenidas por las asociaciones de cazadores
- *Acopios combustibles*. Durante las tareas de desbroce se generan grandes acopios de material combustible que incrementan el peligro de incendio hasta que son retirados. A veces se tarda meses o incluso años en realizar la retirada de dichos materiales, por lo que se decidió inventariarlos
- *Conducciones*. En un punto el camino se cruzaba con una conducción de agua

El programa *RoadPlayer* se utilizó también para medidas de distancias e informes de altitud y pendientes. El programa QGIS se utilizó para realizar

reproyecciones de los datos. El programa JOSM se utilizó para añadir los nodos individuales y la información temática a los elementos de inventario.

4.9.2.3. Resultados

El resultado del ensayo se compone de varios ficheros:

- Se creó un proyecto en el programa QGIS que incluye las trazas y una capa de puntos con todos los elementos de inventario en formato *shapefile*. Estas capas están en coordenadas UTM ETRS89 y proyectadas sobre las ortofotografías del PNOA
- Proyecto para el programa *RoadPlayer* con la filmación de los recorridos de subida y bajada al cerro del Telégrafo
- Proyecto para el programa JOSM con todos los datos de inventario
- Fichero *.osm* del inventario en el formato propuesto en la tesis.

El fichero *.osm* resultado del inventario se puede consultar en el repositorio de la tesis. En el anexo B.2 se muestran algunos ejemplos de elementos seleccionados de dicho inventario.

En la figura 4.28 se pueden ver dos detalles del recorrido. En la figura 4.28a se observan las tareas de aplicación de plaguicida contra la oruga procesionaria. Esta plaga asola la zona en los últimos años y obliga a cerrar el tránsito de personas por el camino en determinadas épocas. Es importante inventariar las masas forestales a los lados del camino, indicando su tipo, debido a sus diferencias en cuanto a plagas y a su potencia combustible. Dichos datos ayudan a la prevención y a la eficiencia de las actuaciones de los servicios de protección. En la figura 4.28b se observa el cauce para drenaje lateral, la acequia de paso bajo el camino, y una grieta por fallo de dicho drenaje.

La figura 4.29a muestra uno de los *pasos canadienses* situado al inicio del camino para evitar la salida del ganado. Consiste en una parrilla de barras o rejas metálicas paralelas que se instala en posición horizontal y a nivel de rasante. Las barras se disponen transversales a la dirección de la vía. Bajo la parrilla hay un pequeño foso de unos 30 cm de profundidad. Los animales evitan cruzar sobre el paso canadiense, en primer lugar, porque les provoca desconfianza y, en segundo, porque les resulta difícil hacerlo. Sin embargo, para los vehículos y personas calzadas no representa especial dificultad, de modo que permite un tránsito selectivo. En la parte derecha de la misma fotografía se pueden ver algunos elementos de señalización vertical. En la figura 4.29b se puede ver una de las fuentes, en concreto, la *Fuente del Retén*. Dichas fuentes son de agua potable procedente de manantial. Aguas abajo de cada fuente existe un depósito enterrado

Fig. 4.28: Camino de acceso al Cerro de Cabeza Mediana. a) Trabajos de aplicación de plaguicida. b) Detalle del camino, del cauce lateral y de grieta producida por fallo del drenaje

Fig. 4.29: a) Detalle de paso canadiense para impedir el paso de ganado. b) Fuente del Retén

de unos 50 m^3 de capacidad, que sirve para cargar las bombas de los servicios de protección civil durante las actuaciones de extinción de incendios. Además de las fuentes para personas, existen dos abrevaderos para el ganado.

La figura 4.30a muestra uno de los comederos para especies cinegéticas de la zona, como conejos, perdices, codornices y jabalíes. Están dispuestos a los lados del camino y, aunque no se aprecia en la figura, junto a cada comedero existe otra estructura menor para bebedero. Dichas instalaciones son mantenidas por las asociaciones de cazadores de la zona, encargados también de la repoblación de

Fig. 4.30: *a) Comedero cinegético. b) Acopio de material combustible*

algunas de las especies. La figura 4.30b muestra uno de los acopios de material combustible que se originan a raíz de las labores de desbroce y mantenimiento. Dichos acopios representan un peligro añadido a los riesgos de incendio propios de la zona. En la misma fotografía se puede ver un elemento de señalización vertical.

Fig. 4.31: *a) Torre eléctrica de alta tensión. b) El autor de la tesis junto al vértice geodésico El Pinar*

En la figura 4.31a se muestra una de las torres de alta tensión de la línea eléctrica que atraviesa la ladera, en concreto la del punto donde la línea eléctrica pasa a ser enterrada hasta el municipio. Constituyen puntos de especial importancia para su protección en caso de incendio, pero, al mismo tiempo, puntos con potencialidad de originar los incendios por chispas, caída de rayos u otras causas. La figura 4.31b muestra al autor de la tesis junto al vértice geodésico de «El Pinar», en la parte alta

del Cerro Cabeza Mediana.

4.9.3 Vía ciclista en Cambridgeshire

Fig. 4.32: Mapa de situación de la vía ciclista de Cambridgeshire en East Anglian (Inglaterra)

Este caso de estudio corresponde a una vía ciclista en Cambridgeshire, uno de los condados de East Anglian en Inglaterra. La figura 4.32 muestra el mapa de situación de la vía. El fichero original se descargó desde la base de datos de OpenStreetMap y se añadieron ciertas modificaciones para comprobar el procedimiento de reutilización de la información ya existente.

4.9.3.1. Toma de datos

Los ficheros en formato *.osm* procedentes de la base de datos de OpenStreetMap mantienen siempre la misma estructura: en primer lugar aparece la lista de elementos *Node*, a continuación aparece la lista de elementos *Way* y, por último, aparece la lista de elementos *Relation*.

El fichero se descargó desde la base de datos de OpenStreetMap utilizando la herramienta de consultas *Overpass Turbo* (Raifer, 2014). Overpass Turbo proporciona un lenguaje estructurado para consultas a la base de datos No-SQL de OpenStreetMap, equivalente al lenguaje SQL para bases de datos relacionales. En este caso, si se examina el final del fichero, se puede comprobar que sólo hay un elemento *Relation*, que es el que representa la vía ciclista propiamente dicha. Dicho elemento *Relation* contiene una lista de etiquetas con la información

temática de la vía ciclista, y una lista de 104 elementos *Way*, cada uno de ellos identificado mediante su identificador «*id*».

Todos esos elementos *Way* son los que aparecen listados en el fichero, antes del elemento *Relation* que representa a la vía ciclista. Si se examina cualquiera de los elementos *Way* referenciados, se puede comprobar que cada uno de ellos está formado de una lista de etiquetas, que dota al tramo de línea de la información temática correspondiente, y una lista de elementos *Node*, cada uno de ellos referenciado a través de su identificador «*id*».

Los *Nodes* referenciados en las líneas *Way* son los que aparecen en la primera parte del fichero *.osm*, delante de la lista de elementos *Way*. En total hay 952 elementos *Node* en el fichero, cada uno de ellos con sus coordenadas y su propia lista de etiquetas para dotarlos de la información temática correspondiente. Si se examina la lista de *Nodes*, se puede comprobar que no todos tienen información temática, muchos de ellos sólo tienen coordenadas, pues no representan ningún punto característico, sino que sólo sirven para dar forma a la geometría de las líneas *Way*.

4.9.3.2. Procesamiento de los datos

Para procesar el fichero OSM se utilizó el programa JOSM. Mediante este programa se modificó el valor de algunas etiquetas y se añadieron otras nuevas.

El fichero modificado se guardó en el formato *.osm* y se realizaron algunas operaciones de análisis espacial mediante la base de datos *Postgis* y el programa QGIS, para comprobar el buen funcionamiento de los ficheros modificados.

4.9.3.3. Resultados

El listado de la figura 4.33 muestra un fragmento del fichero resultado del inventariado de la vía ciclista. El primer *Node* que se ve en el listado corresponde a una señal de tráfico del tipo «*City Limit*», que indica el límite administrativo de la población. El segundo elemento es un *Node* que corresponde a un «*cruce a nivel*». El siguiente elemento es del tipo *Way* y representa un puente. Los *Nodes* que forman la línea del puente están referenciados a través de su «*id*» y se pueden encontrar en el propio fichero *.osm*. El último elemento que aparece en la figura es el elemento *Relation* que representa la vía ciclista. Este elemento está compuesto de etiquetas y de elementos *Way* referenciados a su vez por su identificador «*id*». En este último elemento se puede ver la etiqueta que se ha añadido con el nombre en español de la vía ciclista.

Fig. 4.33: *Inventario de una vía ciclista en Cambridgeshire*

```
<node id="31932512" lat="52.1266913" lon="0.0431664">
<tag k="description" v="BARRINGTON | Reduce your speed"/>
<tag k="note" v="Village sign and speed limit transition at Foxton end
  of bridge"/>
<tag k="traffic_sign" v="city_limit"/>
</node>
<node id="31932653" lat="52.1239541" lon="0.0478815">
<tag k="crossing:gated" v="no"/>
<tag k="description" v="Level crossing no longer in use"/>
<tag k="name" v="Foxton Road crossing"/>
<tag k="note:description" v="Description correct circa late August
  2010."/>
<tag k="railway" v="level_crossing"/>
</node>
<way id="4907197">
<nd ref="31932844"/>
<nd ref="31932512"/>
<tag k="bridge" v="yes"/>
<tag k="highway" v="tertiary"/>
<tag k="layer" v="1"/>
<tag k="maxspeed" v="30 mph"/>
</way>
<relation id="935883">
<member type="way" ref="5015779" role=""/>
<tag k="type" v="route"/>
<tag k="route" v="bicycle"/>
<member ... list of 103 member ways />
<member type="way" ref="4801560" role=""/>
<tag k="abutters" v="leisure"/>
<tag k="description" v="National Byway route through Cambridgeshire"/>
<tag k="name" v="National Byway (Cambridgeshire)"/>
<tag k="name:es" v="Vía ciclista de Cambridgeshire"/>
<tag k="network" v="rcn"/>
<tag k="ref" v="NB"/>
</relation>
```

El resultado final del fichero completo *.osm* modificado se puede consultar en el repositorio de código creado para la tesis. En el anexo B.3 se muestran algunos elementos *Node*, *Way* y *Relation* de dicho inventario, a modo de ejemplo.

Fig. 4.34: Mapa de situación de la vía ciclista de Sutherland a Taren Point, en Sydney (Australia)

4.9.4 Vía ciclista en Sydney (Australia)

La ciudad de Sydney, en Australia, dispone de una importante red de vías ciclistas y pedestres que conectan distintas zonas de la ciudad y también con las localidades próximas. Se ha escogido la vía que une Sutherland, una localidad a 30 kilómetros al sur del centro de Sydney con Taren Point, 20 kilómetros al sur de Sydney, el punto donde nace el Puente del Capitán Cook que atraviesa la bahía de Sydney. El propio puente dispone de carriles para automóviles, vía ciclista y camino pedestre.

En la figura 4.34 se puede ver el trazado de la vía, que se ha tomado de fuentes de datos públicas. La fecha de la última actualización de los datos utilizados, 2015-04-01, se pudo saber a través de los metadatos que incorporaban las propias fuentes de datos utilizadas. La vía transcurre paralela a los carriles destinados a los automóviles, atravesándolos en algunos puntos. La figura 4.35a muestra uno de esos puntos donde la vía ciclista atraviesa la calzada destinada a automóviles. Se puede apreciar la señalización pintada en el pavimento que indica que la vía se comparte por parte de los ciclistas y los peatones, teniendo estos últimos prioridad. La figura 4.35b muestra otro detalle del recorrido de la vía ciclista, en doble carril paralelo a la calzada de automóviles, con el detalle de la señalización horizontal y de un obstáculo correspondiente a la señalización vertical de la carretera para automóviles.

Fig. 4.35: Detalles de la vía ciclista de Sutherland a Taren Point. **a)** Cruce con la calzada para automóviles. **b)** Señalización horizontal

Fig. 4.36: Línea de autobús número 66 de Ashdod (Israel) con indicación de las paradas

4.9.5 Línea de autobús en Ashdod (Israel)

Ashdod es una ciudad del Distrito Meridional de Israel. Corresponde a la antigua Asdod, una de las ciudades más antiguas del mundo y una de las cinco ciudades-estado de los filisteos, mencionada 13 veces en la Biblia. Ashdod es un importante centro industrial de la región. El puerto de Ashdod es el mayor puerto de Israel, donde se importa el 60 % de los bienes importados en el país. La moderna Asdod fue fundada en 1956 y, según la Oficina Central de Estadísticas de Israel, tenía una población de 206.400 habitantes y una superficie de 47.242 kilómetros cuadrados a finales de 2009.

Se ha escogido este caso de estudio por un doble motivo. Por un lado es un caso significativo de etiquetado de elementos en múltiples idiomas. Por otra parte, sirve de ejemplo para el inventariado de una línea de autobús en una ciudad militante en la reducción de la contaminación ambiental. En el caso de las líneas de transporte público, se trata de reutilizar la información de las geometrías y otros elementos de los inventarios municipales, para generar información que puede ser de utilidad para programas navegadores para peatones. Estos programas calculan rutas óptimas entre dos puntos utilizando el transporte público, distancias a las paradas y otros datos de interés al tráfico peatonal en las grandes ciudades. Facilitar y optimizar la utilización del transporte público es una de las estrategias a seguir en orden a reducir la carga de tráfico de automóviles en las grandes ciudades.

```
<node id="1788343690" lat="31.7879383" lon="34.6433187">
  <tag k="crossing" v="island"/>
  <tag k="crossing_ref" v="zebra"/>
  <tag k="highway" v="crossing"/>
</node>
<node id="1802991698" lat="31.7962362" lon="34.6323772">
  <tag k="description" v="אשדוד 13 כתובת: אקסודוס"/>
  <tag k="gtfs:id" v="25905"/>
  <tag k="highway" v="bus_stop"/>
  <tag k="name" v="אקסודוס/לילי"/>
  <tag k="name:en" v="Exodus / Lily"/>
  <tag k="name:es" v="Éxodo / Lily"/>
  <tag k="ref" v="11425"/>
  <tag k="source" v="israel_gtfs_v1"/>
</node>
<node id="2026381343" lat="31.7838906" lon="34.6557635">
  <tag k="bicycle" v="yes"/>
  <tag k="crossing" v="uncontrolled"/>
  <tag k="crossing_ref" v="tiger"/>
  <tag k="highway" v="crossing"/>
</node>
```

Fig. 4.37: Detalle de elementos Node de la línea de autobús número 66 de Ashdod (Israel)

La línea de autobús seleccionada fue la línea número 66. La figura 4.36

muestra el trazado de la línea de autobús y sus paradas. La fuente de datos fue la base de datos de OpenStreetMap. En este caso se utiliza un elemento *Relation* del tipo ROUTE. El elemento ROUTE reutiliza varias geometrías *Way* preexistentes correspondientes a calles de la ciudad, las unifica en un único elemento *Relation*, y añade la información temática correspondiente a la línea de autobús. El elemento *Route* puede incluir información en diferentes idiomas acerca de la frecuencia de paso, horarios, precios y otras informaciones. La figura 4.37 muestra tres elementos *Node* de dicha línea. El primero corresponde a un paso de cebra, elemento necesario para el cálculo de rutas pedestres por las ciudades. El segundo muestra una parada de autobús, con su nombre indicado en hebreo, inglés y español, información que pueden utilizar los programas navegadores. El tercer *Node* corresponde a un paso de cebra en el que está permitido el paso en bicicleta. El listado completo de este caso de estudio, en formato *.osm*, se puede descargar desde el repositorio de la tesis. En el anexo B.5 se muestran algunos elementos seleccionados del inventario.

4.9.6 Camino de Santiago

El último caso de estudio corresponde a un tramo del Camino de Santiago, en España, como ejemplo de inventariado de una vía pedestre. Se trata de un tramo del *Camino Francés*, que llega a Santiago de Compostela desde el norte. Como es conocido, el Camino de Santiago es recorrido a pie, en bicicletas, a caballo y por otros medios por cientos de miles de personas cada año. Todo el recorrido está señalizado. En España existe una norma específica para su señalización (*Dirección General de Carreteras*, 2008).

En la figura 4.38 se puede ver el mapa de situación del tramo elegido. Los datos se han descargado de fuentes públicas. Se formateó el fichero original y se hicieron pruebas con Postgis de medidas de distancias y referencia lineal de algunos elementos. La figura 4.39 muestra tres de los *Nodes* de dicha vía. El primero corresponde a la *Igrexa Parroquial de Santiago*, etiquetada en inglés como lugar de culto y con indicación de la religión a la que corresponde. El segundo elemento describe un punto de información turística. El tercer *Node* indica un punto del camino con barrera de bolardos pero con indicación de tráfico permitido a peatones, bicicletas y caballos. El fichero con la capa vectorial *.osm* de este caso de estudio se puede descargar desde el repositorio de la tesis. En el anexo B.6 se pueden ver algunos elementos *Node*, *Way* y *Relation* a modo de ejemplo.

Fig. 4.38: Tramo del Camino de Santiago para acceso por el norte a Santiago de Compostela (España)

```
<node id="280513649" lat="43.4056519" lon="-8.1714266">
  <tag k="amenity" v="place_of_worship"/>
  <tag k="denomination" v="catholic"/>
  <tag k="name" v="Igrexa Parroquial de Santiago"/>
  <tag k="religion" v="christian"/>
</node>
<node id="285960260" lat="42.8923227" lon="-8.5369749">
  <tag k="information" v="guidepost"/>
  <tag k="name" v="km 1,635"/>
  <tag k="tourism" v="information"/>
</node>
<node id="764912096" lat="42.8830047" lon="-8.5421734">
  <tag k="barrier" v="bollard"/>
  <tag k="bicycle" v="yes"/>
  <tag k="foot" v="yes"/>
  <tag k="horse" v="yes"/>
</node>
```

Fig. 4.39: Detalle de elementos Node del Camino de Santiago (España)

4.10 CONCLUSIONES

El modelo de datos propuesto en esta tesis ofrece las siguientes ventajas en comparación con otros modelos de datos y estándares existentes:

- Propone un esquema abierto y sencillo que facilita el desarrollo de herramientas específicas en cualquier lenguaje de programación
- La flexibilidad del modelo propuesto le permite adaptarse a inventarios sencillos pero también a cualquier nivel de complejidad, como el caso de inventarios de redes de carreteras para las autoridades encargadas del proyecto, construcción y explotación de las mismas. En concreto es posible modelizar la geometría de las carreteras, la referencia lineal, la segmentación dinámica, los firmes, la visibilidad, los gálibos y todas las variables de inventario relativas a carreteras convencionales
- Es posible la reutilización de la información existente en un inventario, modificarla, ampliarla y servir al interés de otros agentes o tipos de inventarios diferentes del original. Cualquier agente interesado en la información contenida en un inventario ya existente puede desarrollar sus propias herramientas que le permitan adaptar la información al uso específico que quiera darle
- El esquema propuesto requiere un periodo muy corto de aprendizaje. Esta característica es de gran importancia en los casos de inventarios tras catástrofes
- El proceso de trabajo incremental propuesto permite la utilización de técnicas de trabajo colaborativo, lo que facilita también su utilización en los inventarios tras catástrofes
- El modelo se puede implementar en cualquier idioma y es adaptable a la normativa específica de cualquier país
- El modelo es adaptable al inventariado de cualquier tipo de vía, no sólo a las carreteras tradicionales para automóviles
- Existen numerosas herramientas de software libre que permiten editar, visualizar o analizar la información contenida en los ficheros en formato OSM. La mayoría de los software SIG de escritorio reconocen los ficheros en formato OSM. Es posible utilizar herramientas externas para (1) crear y editar la base de datos, (2) realizar consultas y análisis sobre los datos y (3) visualizar gráfica y alfanuméricamente los resultados de cualquier inventario
- Existen herramientas para realizar la exportación de los ficheros OSM a las bases de datos más conocidas con capacidad de análisis espacial

5. RECONSTRUCCIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL

5.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo dedicado al estado del arte se han detallado los distintos procedimientos publicados para la reconstrucción de la geometría del trazado de las carreteras, tanto en planta como en alzado. También se ha indicado en dicho capítulo que la reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal ha sido tratada por menos autores que la del trazado en planta. De hecho, en el estudio de la literatura existente sobre el tema, no se ha encontrado ningún procedimiento automatizado y eficaz que realice la reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal a partir de datos procedentes de dispositivos GNSS o de otro tipo de sensores.

Podría sacarse la conclusión de que la geometría del perfil longitudinal es menos importante que la del trazado en planta, pero es una conclusión errónea. Los estudios de seguridad, los de visibilidad o los de consumos de los vehículos están directamente afectados por la geometría del perfil longitudinal.

Es posible que la causa de ese menor número de estudios esté en que la precisión de los dispositivos GNSS en la medida de la altitud es menor que la precisión de los datos de la proyección en planta. Además, para una misma magnitud del error, por ejemplo 1 m en una distancia entre puntos de 10 m, su afección al cálculo de un radio de curvatura de varios cientos de metros es mucho menor que frente a una diferencia de cotas medida en centímetros.

En este capítulo se describe un procedimiento que permite la reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal a partir de los datos de las pendientes de la carretera tomados a intervalos regulares mediante clinómetros o mediante dispositivos GNSS.

El objetivo del capítulo es doble. En primer lugar se trata de desarrollar un procedimiento para determinar el perfil longitudinal de una carretera a partir de datos discretos de sus pendientes tomados *in situ*. El perfil longitudinal resultante estará descrito como una serie de rampas y pendientes conectadas por los correspondientes acuerdos parabólicos. Esto es, partiendo de una colección ordenada de puntos del perfil longitudinal de la carretera de los que se conoce su distancia al origen del tramo, s , y su pendiente longitudinal, g , se determinarán las

expresiones analíticas de una serie ordenada de rampas, pendientes y acuerdos parabólicos que describan geométricamente dicho perfil longitudinal. El segundo objetivo del capítulo es validar el procedimiento mediante la determinación de los errores que se cometen en la reconstrucción de la geometría.

Es difícil disponer de datos precisos de la geometría de carreteras ya construidas, con los que se puedan poner a punto los algoritmos de reconstrucción y se pueda comprobar la exactitud de los resultados obtenidos. Además, aun disponiendo de datos de algunas carreteras, no es fácil disponer de carreteras en los que estén representadas las numerosas situaciones que se pueden dar al concatenar las geometrías de las distintas rasantes que componen un perfil longitudinal. Por ello, se ha desarrollado una herramienta informática que permite la creación de perfiles longitudinales sintéticos con parámetros aleatorios. La herramienta desarrollada permite configurar los valores máximos y mínimos de los distintos parámetros que definen la geometría de las rasantes. Además, es posible generar perfiles con valores *extremos* de los parámetros de las rasantes. Por ejemplo se puede elegir crear pendientes muy pronunciadas o acuerdos muy aguzados. De esta manera se puede llegar a cubrir todas las situaciones que se pudieran dar en las carreteras. Los perfiles sintéticos se han utilizado para calibrar y perfeccionar los algoritmos de reconstrucción desarrollados. Posteriormente, los algoritmos de reconstrucción se han puesto a prueba mediante su aplicación a la reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de algunas carreteras reales ya construidas.

El capítulo está organizado en doce apartados. En el apartado 2 se describe la geometría de los perfiles longitudinales de las carreteras que se construyen en la actualidad. El apartado 3 es una justificación teórica de la obtención de la función $z = f(s)$, que representa el perfil longitudinal, como integral de la función $g = f'(s)$, que representa su diagrama de pendientes. El apartado 4 está dedicado a describir en detalle el algoritmo de reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal a partir de las pendientes longitudinales de una colección de puntos de su eje. El apartado 5 describe el programa que se ha desarrollado al efecto de implementar el algoritmo de reconstrucción. En el apartado 6 se describe el módulo del programa anterior dedicado a la generación de perfiles sintéticos aleatorios de carreteras. Los apartados 7, 8, 9 y 10 describen los diferentes ensayos que se han llevado a cabo para poner a prueba y validar el algoritmo propuesto: ensayos sobre perfiles sintéticos, ensayos con el perfil longitudinal de un proyecto, ensayos con datos procedentes de clinómetros y ensayos con datos procedentes de receptores GNSS. En el apartado 11 se realiza un análisis global de los resultados obtenidos en los distintos ensayos. Por último, el apartado 12 expone las conclusiones que se pueden extraer del resultado de los ensayos y se proponen futuras líneas de

investigación.

5.2 GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL DE UNA CARRETERA

La geometría del eje de las carreteras es una curva en tres dimensiones. Con el fin de facilitar su estudio, es habitual estudiar por separado dos componentes: el trazado en planta y el perfil longitudinal. El trazado en planta es la proyección sobre un plano horizontal del eje de la carretera. El trazado en alzado, denominado «*perfil longitudinal*», es la representación gráfica de una función $z = f(s)$, donde s es la distancia recorrida a lo largo del eje de la carretera contada a partir del origen del tramo, y z es la cota o altitud de los puntos del eje respecto de un plano horizontal de referencia.

En la actualidad, las carreteras se construyen de forma que su perfil longitudinal está formado por tramos de pendiente (inclinación) constante enlazados por otros en los que la pendiente (inclinación) varía de manera lineal. Los tramos de pendiente constante se denominan «*rampas*», cuando la inclinación es positiva según el sentido de recorrido, y «*pendientes*», cuando la inclinación es negativa. Los tramos con variación lineal de la pendiente se denominan «*acuerdos parabólicos*», por ser una parábola la curva $z = f(s)$ a que dan lugar en el perfil longitudinal. En castellano se da la coincidencia de que recibe la misma denominación la pendiente trigonométrica de una función que las rasantes del perfil longitudinal con inclinación constante negativa. En la mayoría de las explicaciones que siguen, el contexto permitirá diferenciar a cuál de los dos conceptos de *pendiente* se refiere el texto.

En el gráfico correspondiente al perfil longitudinal de una carretera, las rampas están representadas por rectas de inclinación positiva, las pendientes están representadas por rectas de inclinación negativa y los acuerdos parabólicos están representados por parábolas de segundo grado y eje vertical que conectan las rampas y pendientes entre sí. Los acuerdos parabólicos pueden ser cóncavos, cuando la pendiente crece en el sentido de avance de las abscisas s , o convexos cuando la pendiente es decreciente.

La expresión general de un tramo de inclinación constante del perfil longitudinal, rampa o pendiente, es la siguiente:

$$z = a_0 + a_1 s \quad (5.1)$$

En la expresión 5.1, z es la cota o altitud del punto, s es la distancia recorrida a lo largo del eje de la carretera a partir del origen del tramo considerado y (a_0, a_1) , son los parámetros que caracterizan geométricamente la recta. En estas rasantes, la inclinación de la carretera es constante y de valor a_1 . Si se denomina g (del inglés *grade*) al valor de la pendiente (inclinación) de la recta definida por la expresión 5.1, se puede escribir:

$$g = a_1 \quad (5.2)$$

Como ya se ha mencionado, los acuerdos parabólicos son parábolas de segundo grado y eje vertical. Su expresión general en el perfil longitudinal es la siguiente:

$$z = a_0 + a_1s + a_2s^2 \quad (5.3)$$

En la expresión 5.3, z es la cota o altitud del punto, s es la distancia recorrida a lo largo del eje de la carretera a partir del origen del tramo considerado y (a_0, a_1, a_2) , son los parámetros que definen geométricamente la parábola. En carreteras, es habitual caracterizar los acuerdos parabólicos mediante el denominado «*parámetro del acuerdo*», K_v , que se define mediante la siguiente expresión:

$$K_v = \frac{1}{2a_2} \quad (5.4)$$

Utilizando el concepto de parámetro K_v , la expresión general de un acuerdo parabólico queda de la siguiente manera:

$$z = a_0 + a_1s + \frac{1}{2K_v}s^2 \quad (5.5)$$

El signo del parámetro K_v indica el carácter cóncavo o convexo de la parábola del acuerdo. Así, si el parámetro es positivo, la pendiente crece con el avance de la curva y el acuerdo es cóncavo. Por el contrario, si el parámetro K_v es negativo, la pendiente de la curva decrece con el avance de la misma, y el acuerdo es convexo. El valor absoluto del parámetro K_v también da indicaciones acerca de la forma del acuerdo. Valores absolutos mayores del parámetro corresponden a parábolas más tendidas, mientras que los valores absolutos menores se corresponden con parábolas más aguzadas. Las dimensiones del parámetro K_v son las de una longitud. En el sistema internacional los valores de K_v se dan en m .

La pendiente en cada punto de un acuerdo parabólico viene dada por la derivada de la expresión 5.5. Si se denomina g al valor de la pendiente, la

expresión general de la pendiente de los puntos del perfil longitudinal situados en un acuerdo parabólico será:

$$g = a_1 + \frac{1}{K_v} s \quad (5.6)$$

Se puede observar que la expresión de la pendiente de los puntos de un acuerdo parabólico es una expresión lineal de s . Como se había indicado, en los acuerdos parabólicos la pendiente crece o decrece de manera lineal. Su representación gráfica es una recta de inclinación $1/K_v$.

Se puede realizar el gráfico o «*diagrama de pendientes*» de los perfiles longitudinales de las carreteras. Consiste en representar en un gráfico los valores (s, g) de los puntos del eje de la carretera, donde s es la abscisa del punto y g es la pendiente del mismo en el perfil longitudinal. En el diagrama de pendientes, las rasantes del tipo rampa dan lugar a rectas horizontales situadas por encima del eje de las abscisas, mientras que las rasantes del tipo pendiente dan lugar a rectas horizontales situadas por debajo de dicho eje. Por su parte, los acuerdos parabólicos, dan lugar en el diagrama de pendientes a rectas inclinadas, con pendiente positiva, en el caso de los acuerdos cóncavos, y con pendiente negativa en el caso de los acuerdos convexos.

La figura 5.1a muestra el perfil longitudinal de un tramo de carretera formado por una rampa y una pendiente, enlazadas por un acuerdo parabólico convexo. La figura 5.1b corresponde al diagrama de pendientes del perfil anterior. Se puede comprobar que la rampa previa al acuerdo y la pendiente posterior al mismo están representadas en el diagrama de pendientes por sendas rectas horizontales, mientras que el acuerdo está representado por una recta inclinada con pendiente negativa de valor $1/K_v$.

Las carreteras se diseñan de forma que el perfil longitudinal tenga continuidad de primer orden. Entre cada dos rasantes consecutivas hay continuidad en la ordenada z y en la pendiente g , pero no en la curvatura. Esta condición equivale a decir que no puede haber dos rasantes de pendiente constante consecutivas con distinta inclinación. Hay que disponer siempre un acuerdo parabólico que proporcione la variación lineal de la inclinación entre la correspondiente al final de la primera alineación y la correspondiente a la segunda alineación. Sí que puede suceder, en cambio, que haya dos acuerdos parabólicos consecutivos sin una rampa o una pendiente interpuesta. En realidad esas situaciones se podrían interpretar como el caso límite de dos acuerdos parabólicos unidos mediante una rasante de pendiente constante y longitud cero.

Fig. 5.1: a) Perfil longitudinal; b) Diagrama de pendientes

Si se analiza el caso de dos rasantes consecutivas de un perfil longitudinal, se pueden dar diferentes situaciones. Si la primera de las dos rasantes en el sentido de avance de las abscisas s es de pendiente constante, rampa o pendiente, la segunda será necesariamente un acuerdo parabólico. Por contra, si la primera es un acuerdo parabólico, puede suceder que la segunda sea de pendiente constante o bien otro acuerdo parabólico con diferente parámetro K_v . En todos los casos, en el diagrama de pendientes del perfil longitudinal, aparecerá un punto singular entre cada dos rasantes consecutivas. Esto es una consecuencia de la no continuidad de las curvaturas. En los casos en los que una de las rasantes es de pendiente constante y la otra un acuerdo parabólico, el punto común a ambas tendrá, en el diagrama de pendientes, un tramo horizontal a uno de los lados y un tramo inclinado al otro lado. En los casos de dos acuerdos parabólicos consecutivos, el punto común a las dos rasantes tendrá, en el diagrama de pendientes, tramos inclinados a ambos lados, aunque dichos tramos tendrán diferente inclinación.

En este trabajo de investigación se propone un procedimiento para la reconstrucción de la geometría de las distintas rasantes que componen el perfil

longitudinal de una carretera basado en la identificación de dichos puntos singulares del diagrama de pendientes. Los datos de entrada a los algoritmos que se van a desarrollar son las abscisas s y las pendientes g de una serie de puntos a lo largo del recorrido de la carretera y el resultado es la descripción geométrica de las distintas rasantes que forman el perfil longitudinal. Esto es, a partir de una colección ordenada de valores (s, g) de los puntos del eje de la carretera, se obtendrán las expresiones analíticas de las distintas rasantes que componen el perfil longitudinal de la misma: rampas, pendientes y acuerdos parabólicos.

Hay distintos dispositivos que se pueden utilizar para la obtención de datos acerca de la geometría de la carretera, a medida que se recorre. Son habituales los dispositivos GNSS, los odómetros, los clinómetros y los LIDAR. Los odómetros proporcionan directamente la medida de la distancia recorrida, esto es, la abscisa s de los puntos del perfil longitudinal. Los clinómetros proporcionan las pendientes longitudinales g de los puntos del recorrido. En el caso de los dispositivos GNSS y los LIDAR, los datos que se obtienen son las coordenadas (x, y, z) de los puntos.

En los casos en los que el dato proporcionado por los dispositivos de medida sean las coordenadas (x, y, z) de los puntos, es posible obtener los valores de la distancia s y de la pendiente g entre cada dos puntos consecutivos. Si (x_i, y_i, z_i) y $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ son las coordenadas correspondientes a dos puntos consecutivos del eje, las expresiones 5.7 y 5.8 permiten calcular el valor de la distancia y de la pendiente desde el punto i al punto $i + 1$:

$$\Delta s = s_{i+1} - s_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (5.7)$$

$$g_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{s_{i+1} - s_i} \quad (5.8)$$

Dado que el algoritmo que se ha desarrollado toma como datos de entrada los valores de las distancias al origen s_i y las pendientes g_i de una serie ordenada de puntos del perfil de la carretera, en los casos en los que los datos de los que se disponga sean las coordenadas (x_i, y_i, z_i) de los puntos, será necesaria la obtención previa de los datos (s_i, g_i) mediante las expresiones 5.7 y 5.8. Este proceso también está integrado en el algoritmo de reconstrucción, de forma que el programa admite como entrada de datos la colección de valores (s_i, g_i) o la de los valores (x_i, y_i, z_i) . En este último caso, el programa calcula los valores de s_i y de g_i antes de proceder a la reconstrucción.

5.3 INTEGRACIÓN DEL PERFIL DE PENDIENTES

Mediante la derivación de la expresión $z = f(s)$ que define el perfil longitudinal, se obtiene el denominado «*diagrama de pendientes*», $g = f'(s)$. De manera análoga, integrando el diagrama de pendientes $g = f'(s)$ se puede obtener el perfil longitudinal:

$$z = \int g(s)ds \quad (5.9)$$

La integral entre dos puntos de abscisas s_1 y s_2 del diagrama dependientes da como resultado el incremento de la cota z entre el punto de abscisa s_1 y el punto de abscisa s_2 . Como es conocido, el valor de dicha integral es el área encerrado entre la curva (s, g) y el eje S (ver figura 5.2):

$$\Delta z = z_{i+1} - z_i = \int_{s=s_i}^{s=s_{i+1}} g(s)ds \quad (5.10)$$

De esta manera, conocida la cota z_1 del primer punto del perfil longitudinal y el valor de las distancias s_i y de las pendientes g_i a lo largo del eje de la carretera, es posible obtener el valor de la cota z_i de todos los puntos del eje. Esta reconstrucción de las cotas z_i de los puntos del eje se puede hacer de manera análoga si en lugar de conocer la cota del primer punto, se conociera la cota de cualquier otro punto del perfil. En el caso de no conocer la cota absoluta de ninguno de los puntos del perfil, se podría considerar que la cota del primer punto es 0 y el perfil longitudinal resultante tendrá la consideración de *incrementos de cota* respecto de la cota del primer punto. Será un perfil paralelo al real, pero desplazado el valor de la cota del primer punto.

Esta integración se puede hacer a partir de las expresiones analíticas de las rasantes del diagrama de pendientes o bien, mediante integración numérica, a partir de los valores discretos g_i de las pendientes en una serie de puntos de abscisas s_i . El valor del incremento de cota entre el punto de abscisa s_i y el punto de abscisa s_{i+1} , conocidas las pendientes g_i y g_{i+1} , se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\Delta z = z_{i+1} - z_i = \frac{g_i + g_{i+1}}{2} (s_{i+1} - s_i) \quad (5.11)$$

Esta integración numérica a partir de los valores de las pendientes en los puntos del eje de la carretera es lo primero que hace el programa de

Fig. 5.2: a) Perfil longitudinal; b) Área encerrada entre dos abscisas del diagrama de pendientes como diferencia de cotas en el perfil longitudinal

reconstrucción. Posteriormente, el programa calcula la expresión analítica de las rasantes que forman dicho perfil longitudinal mediante el algoritmo que se explicará a continuación. A partir de la expresión analítica de las rasantes se pueden calcular unas cotas de los puntos del perfil longitudinal que se denominan (s_i^*, z_i^*) . La comparación de los valores (s_i, z_i) , obtenidos a partir de la integración numérica de las pendientes, con los valores (s_i^*, z_i^*) , obtenidos a partir de las expresiones analíticas de las rasantes del perfil longitudinal resultantes del algoritmo de reconstrucción, permite hacer una estimación del error cometido en la reconstrucción de la geometría del perfil.

5.4 ALGORITMO DE RECONSTRUCCIÓN

El procedimiento que se propone en esta tesis identifica, en primer lugar, los puntos singulares del diagrama de pendientes de una carretera, esto es, los puntos comunes entre cada dos rasantes del perfil longitudinal. A continuación se calculan las expresiones analíticas de las líneas del diagrama de pendientes que corresponden a cada una de la rasantes. Finalmente, se integran dichas

expresiones para dar lugar a las expresiones analíticas de las rasantes del perfil longitudinal de la carretera. El último paso es comparar las cotas que se obtienen a partir de las rasantes resultantes, con las cotas del perfil original obtenido por integración numérica de las pendientes, para calcular el error cometido. Los errores que se calculan son el error cuadrático medio y la media, desviación típica y valor máximo del valor absoluto del error.

Mediante este procedimiento se pueden identificar, no sólo los casos de una alineación de pendiente constante seguida o precedida por un acuerdo parabólico, sino también los casos correspondientes a dos o más acuerdos parabólicos consecutivos, sin rasantes de pendiente constante interpuesta.

Si se analizan los puntos que aparecen en el diagrama de pendientes de una carretera se pueden clasificar en tres tipos:

- Puntos que pertenecen a una alineación de pendiente constante, que son los que están situados en una recta horizontal del diagrama de pendientes
- Puntos que pertenecen a un acuerdo parabólico, que son los situados en una recta inclinada del diagrama de pendientes
- Puntos singulares o «*puntos frontera*» entre dos rasantes, que presentan un tramo horizontal a uno de los lados y un tramo inclinado al otro lado, o bien tramos inclinados de diferente inclinación a ambos lados

La figura 5.3a representa el perfil longitudinal de un tramo de carretera. La primera alineación del perfil es una rampa que discurre entre los puntos de abscisas s_1 y s_2 . A continuación hay un acuerdo parabólico convexo, que comienza en el punto de abscisa s_2 con pendiente positiva y va disminuyendo su pendiente hasta llegar al punto de abscisa s_3 con pendiente negativa. En este punto comienza un acuerdo parabólico cóncavo que termina en el punto de abscisa s_4 con pendiente de nuevo positiva. Desde s_4 hasta s_5 hay una nueva rampa, de pendiente menor que la primera del tramo. En la parte inferior, la figura 5.3b muestra el diagrama de pendientes correspondiente al perfil anterior. Se puede apreciar que entre cada dos rasantes aparece un punto singular o frontera, con tramos de distinta inclinación a ambos lados del mismo.

En la figura 5.3b se han marcado puntos representativos de los tipos de puntos de la clasificación del párrafo anterior. Los puntos P_6 y P_9 son puntos del primer tipo, están situados en rasantes de pendiente constante y tienen, a ambos lados, tramos horizontales del diagrama de pendientes. Los puntos P_7 y P_8 son puntos del segundo tipo, pertenecientes a acuerdos parabólicos y se caracterizan por tener a ambos lados tramos del diagrama de pendientes con la misma inclinación. Los puntos P_2 , P_3 y P_4 son puntos del tercer tipo, puntos singulares o puntos frontera del diagrama de pendientes. P_2 y P_4 son los puntos comunes entre una alineación de

Fig. 5.3: a) Perfil longitudinal; b) Diagrama de pendientes

pendiente constante y un acuerdo parabólico. En ambos casos estos puntos tienen a un lado un tramo horizontal del diagrama de pendientes y, al otro lado, un tramo inclinado. Por último, el punto P_3 está comprendido entre dos acuerdos parabólicos y presenta a ambos lados tramos inclinados del diagrama de pendientes, pero con diferente inclinación a cada lado.

Para clasificar los puntos en uno de los tres tipos indicados, el programa analiza el entorno de cada punto del diagrama de pendientes. Para ello, el programa calcula dos rectas, una basada en los puntos inmediatamente anteriores al punto bajo estudio y otra basada en los puntos inmediatamente posteriores a dicho punto. Si las dos rectas resultan horizontales, el programa considera que el punto está situado en una recta horizontal del diagrama de pendientes y, por tanto, en una rampa o en una pendiente del perfil longitudinal. Si las dos rectas son inclinadas y con la misma pendiente, el programa considera que el punto pertenece

a una recta inclinada del diagrama de pendientes y, por tanto, a un acuerdo parabólico del perfil longitudinal. En el resto de casos, esto es, cuando las dos rectas resultan ser inclinadas y con diferente inclinación o bien cuando una de ellas es horizontal y la otra inclinada, el programa considera que se trata de un punto frontera entre dos rasantes diferentes.

Para decidir cuándo una recta es horizontal, el programa utiliza un parámetro denominado «*pendiente límite*». Cuando la pendiente de una recta del diagrama de pendientes es menor en valor absoluto que la *pendiente límite*, el programa considera que la recta es horizontal. De la misma manera, cuando el valor absoluto de la diferencia entre las pendientes de dos rectas es menor que la *pendiente límite*, el programa considera que las dos rectas tienen la misma inclinación.

Hay que hacer notar que, en la figura 5.3, se han alterado notablemente las escalas del eje Z y del eje G , con el fin de facilitar la percepción de la figura. De acuerdo con la ecuación 5.5, la expresión general de un acuerdo parabólico corresponde a una parábola de segundo grado de eje vertical. En el diagrama de pendientes, los acuerdos parabólicos quedan representados por rectas inclinadas cuya expresión general es la 5.6. Según dicha expresión, la pendiente de las rectas que representan a los acuerdos parabólicos en el diagrama de pendientes tiene un valor de $1/K_v$, donde K_v es el parámetro del acuerdo. Dicho parámetro tiene las dimensiones de una longitud y, cuando se mide en metros, los valores absolutos habituales varían entre varios cientos y varias decenas de miles o incluso más. Esto hace que para un acuerdo cuyo parámetro K_v tuviera un valor de 10000 m , por ejemplo, la pendiente de la recta que lo representaría en el diagrama de pendientes sería de 10^{-4} , prácticamente inapreciable a simple vista en un gráfico del tamaño del de la figura.

Como ya se ha referido, el parámetro K_v será positivo en los casos de acuerdos cóncavos y negativo en los casos de acuerdos convexos. Cuando el parámetro sea positivo, también lo será la pendiente de la recta correspondiente del diagrama de pendientes. Cuando el parámetro sea negativo, la pendiente de la recta en el diagrama de pendientes también será negativa. De acuerdo con los valores habituales del parámetro K_v , los valores absolutos de las pendientes de dichas rectas en el diagrama de pendientes estarán comprendidos entre los siguientes valores:

$$K_v = 200 \rightarrow g = \frac{1}{200} = 5 \times 10^{-3}$$

$$K_v = 100000 \rightarrow g = \frac{1}{100000} = 1 \times 10^{-5}$$

Para poder discernir cuándo una recta del diagrama de pendientes se considera horizontal y cuándo se considera inclinada, el algoritmo necesita utilizar una *pendiente límite* cuyo valor sea menor que la pendiente resultante del máximo valor absoluto del parámetro K_v que se quiera identificar.

El algoritmo de reconstrucción consiste básicamente en los siguientes procesos (ver figura 5.4):

1. Identificación de los puntos frontera entre las distintas rasantes. Este proceso, a su vez, se realiza en varios pasos:
 - a) Clasificación de cada punto de la muestra de puntos (s_i, g_i) como perteneciente a una alineación de pendiente constante, a un acuerdo parabólico o como punto frontera entre dos rasantes diferentes
 - b) Agrupación en un mismo segmento, de todos los puntos del mismo tipo que sean consecutivos
 - c) Tratamiento de los segmentos de puntos frontera resultantes para seleccionar uno de ellos como el punto frontera entre rasantes
2. Cálculo de las expresiones analíticas de las líneas rectas, horizontales e inclinadas, que componen el diagrama dependientes resultante.
3. Integración de las expresiones analíticas anteriores, para obtener las expresiones analíticas de las rasantes del perfil longitudinal de la carretera.

En los siguientes apartados se describen con mayor detalle cada uno de los procesos que componen el algoritmo de reconstrucción desarrollado.

5.4.1 Clasificación de los puntos de la muestra

En lo que sigue hay que recordar que el algoritmo de reconstrucción parte de una muestra de puntos del eje de la carretera de los que se conoce su distancia al origen del tramo medida a lo largo de la carretera, s_i , y su pendiente longitudinal, g_i . Estos puntos son una colección de valores numéricos que constituyen una aproximación del diagrama de pendientes de la carretera.

La clasificación de cada uno de los puntos que componen la muestra numérica del diagrama de pendientes se realiza analizando su entorno. Para ello se trazan dos rectas, una basada en los puntos anteriores al analizado y la otra basada en los puntos posteriores (ver figura 5.5). Para trazar dichas rectas, el programa de reconstrucción ofrece dos opciones:

1. *Por mínimos cuadrados*: las rectas que se calculan son las que mejor aproximan por mínimos cuadrados la serie de puntos del diagrama de pendientes considerados.

Fig. 5.4: Diagrama de flujo del algoritmo de reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal

2. *Por área equivalente:* las rectas que se calculan son las que, pasando por el punto que se está analizando, encierran el mismo área bajo las mismas que la serie de puntos del diagrama de pendientes. Esto equivale a imponer que la diferencia de cota resultante entre los extremos del intervalo considerado sea la misma en la serie de puntos que en la recta de interpolación.

Las dos opciones están justificadas. Como se verá más adelante, en los ensayos realizados las dos opciones arrojaban resultados correctos en el tratamiento de los perfiles sintéticos, si bien la opción de las rectas que encierran el

área equivalente arrojaron mejores resultados en la reconstrucción de los perfiles reales de carreteras. A pesar de ello se ha preferido mantener las dos opciones en el programa, que el usuario pueda experimentar en cada caso con ambas, y elegir la que mejor se adapte al caso concreto de carretera que esté analizando.

Fig. 5.5: Rectas de interpolación anterior, (r_1), y posterior, (r_2), de un punto P_i

En la figura 5.5 se han dibujado las dos rectas de interpolación utilizadas para clasificar el punto P_i de la muestra de puntos del diagrama de pendientes. La recta r_1 es la que se denominará en los apartados siguientes *recta anterior* del punto P_i . La recta r_2 es la que se denominará *recta posterior*. En la figura se ha marcado también el ángulo α que forma la recta r_2 con la horizontal. La comparación de dicho ángulo con el ángulo que da lugar a la *pendiente límite* es el criterio que sigue el algoritmo para decidir si considera la recta horizontal o inclinada.

La longitud de las rectas de interpolación afecta a los resultados obtenidos por el algoritmo de reconstrucción. En la práctica, por tratarse de muestras discretas de puntos, fijar la longitud de las rectas de interpolación equivale a fijar el número de puntos que se considerarán para calcular dichas rectas de interpolación. En la figura 5.5, por ejemplo, se han considerado rectas de interpolación de cuatro puntos, el punto analizado y los tres puntos anteriores o posteriores al mismo. La longitud de las rectas de interpolación de la figura 5.5 será tres veces la separación media entre los puntos de la muestra.

En esta parte del algoritmo, el programa analiza cada uno de los puntos (s_i, g_i) de la muestra, y les asigna uno de los tres tipos de puntos posibles:

1. «*GRADE*»: puntos pertenecientes a rectas horizontales del diagrama de pendientes. En estos puntos las rectas de interpolación anterior y posterior

tienen una inclinación menor que la pendiente límite

2. «*VERTICAL_CURVE*»: puntos pertenecientes a rectas inclinadas del diagrama de pendientes. En estos puntos la inclinación de las rectas de interpolación anterior y posterior es mayor que la pendiente límite, pero la diferencia entre sus inclinaciones es menor que dicha pendiente límite
3. «*BORDER*»: *puntos frontera* entre dos rasantes. Son los puntos singulares del diagrama de pendientes. Estos son los puntos donde el diagrama de pendientes no tiene continuidad en la curvatura. Una de las rectas de interpolación es horizontal y la otra inclinada, o bien, las dos rectas son inclinadas y la diferencia entre las dos inclinaciones es mayor que la pendiente límite

5.4.2 Agrupación de puntos consecutivos del mismo tipo

Al clasificar la muestra según se ha explicado en el apartado anterior, los puntos de los tres tipos indicados no aparecen de forma aislada, salvo excepciones, sino que aparecen agrupados en tramos formados por varios puntos consecutivos del mismo tipo. En esta fase del algoritmo (ver figura 5.4), el programa agrupa en tramos todos los puntos consecutivos de un mismo tipo. Cada tramo se define por los índices inicial y final de los puntos de la muestra que componen el tramo, así como por el tipo de los puntos. Como resultado de este proceso, la muestra de puntos del diagrama de pendientes queda organizada en tramos homogéneos compuestos por varios puntos del mismo tipo.

5.4.3 Selección de los puntos frontera entre rasantes

Los puntos del tipo *BORDER* tampoco aparecen de forma aislada, salvo excepciones. Lo habitual es que, en el entorno de los puntos frontera entre rasantes, haya varios puntos antes y después del verdadero punto *BORDER* que, como resultado del cálculo, queden identificados como puntos frontera. En la figura 5.6 se puede ver la causa de ello.

En la figura 5.6a se muestra, en línea de trazos, la recta de interpolación posterior de un punto (2) situado a la izquierda del verdadero punto frontera (1) entre las rasantes. Si el ángulo α que forma dicha línea con el eje de las abscisas es mayor que el correspondiente a la pendiente límite, el algoritmo interpreta que la línea no es horizontal, y por tanto asigna al punto la condición de punto *BORDER*. Se da por hecho que el algoritmo interpreta como horizontal la recta de interpolación anterior de este punto. Por su parte, en la figura 5.6b, se muestra la

recta de interpolación anterior de un punto (3) situado a la derecha del verdadero punto (1) frontera. Si el ángulo β que forma dicha línea con el eje de abscisas es menor que el correspondiente a la pendiente límite, el algoritmo interpretará la línea como horizontal, y asignará al punto el tipo *BORDER*. En este caso, se supone que la recta de interpolación posterior de este punto se interpreta como inclinada.

Fig. 5.6: a) Recta de interpolación posterior de un punto (2) situado a la izquierda del punto frontera (1) de separación entre rasantes. b) Recta de interpolación anterior de un punto (3) situado a la derecha del punto frontera (1) de separación entre rasantes

El programa procesa cada tramo de puntos *BORDER* y selecciona uno de ellos. A los puntos del tramo que quedan a la izquierda del seleccionado, les asigna el tipo de puntos del tramo precedente. Análogamente, a los puntos del tramo que quedan a la derecha del seleccionado, les asigna el tipo de puntos del tramo siguiente. Para seleccionar el punto *BORDER*, el programa calcula el diagrama de pendientes que correspondería a considerar como límite de rasantes cada uno de los puntos del tramo de puntos *BORDER* y selecciona el que dé lugar a un error cuadrático medio menor, en su comparación con el valor de las pendientes de los puntos originales de la muestra.

Una vez que todos los tramos de puntos frontera entre rasantes quedan reducidos a un único punto, el algoritmo lo asigna a la alineación anterior y a la alineación posterior, pues es el punto común a ambas rasantes.

Al final de este proceso, la muestra de puntos del diagrama de pendientes queda organizada en tramos de puntos del tipo *GRADE* y tramos de puntos del tipo *VERTICAL_CURVE*. El programa aplica entonces dos filtros sucesivos al conjunto de tramos en que ha quedado dividida la muestra de puntos original:

- *Filtrado de tramos cortos:* en los tramos que tienen una longitud menor que la

de un parámetro configurable del programa que se ha denominado *Longitud mínima de las rasantes*, se comprueba si el tramo anterior o el siguiente son del mismo tipo. Si es así, los puntos del tramo «corto» se asignan a dicho tramo. Como se verá más adelante, en las pruebas de reconstrucción realizadas sobre perfiles reales de carreteras, se han utilizado valores entre 10 y 40 metros para dicho parámetro.

- *Filtrado de tramos GRADE consecutivos*: la continuidad exigida al perfil longitudinal hace que no sea posible la existencia de dos tramos del tipo *GRADE* consecutivos, con diferente pendiente. El programa recorre la lista de tramos y localiza las situaciones en las que dos tramos del tipo *GRADE* aparezcan uno a continuación de otro. Cuando así sucede, el programa los sustituye por un único tramo. Este proceso se realiza de manera iterativa hasta que no quede ninguna sucesión de dos tramos *GRADE* consecutivos.

En los ensayos realizados sobre perfiles sintéticos no aparecieron tramos *GRADE* consecutivos. Sin embargo, con datos reales, el error en la medida de las pendientes hace que aparezcan puntos *BORDER* dividiendo zonas que corresponderían a tramos uniformes de pendiente constante. En estas situaciones, por la forma de operar el algoritmo, tras seleccionar y eliminar los puntos *BORDER* quedan dos tramos consecutivos del mismo tipo. Esa es la causa de que se proceda a un filtrado de los mismos. En el caso de los tramos de puntos *VERTICAL_CURVE*, puede suceder lo mismo, que los errores de la muestra den lugar a que queden dos tramos consecutivos que en realidad deberían ser considerados como un único tramo. Más adelante se explicará qué medidas se toman para resolver estas situaciones.

Al final de esta fase del procesamiento, los puntos originales de la muestra de pendientes de la carretera quedan organizados en una lista de tramos de puntos del tipo *GRADE* o del tipo *VERTICAL_CURVE*. Ninguno de los tramos resultantes tiene una longitud inferior a la mínima, si el tramo anterior o el siguiente es del mismo tipo, y no existen en la lista dos tramos de pendiente constante consecutivos.

5.4.4 Cálculo del perfil de pendientes

Una vez que todos los puntos de la muestra están agrupados en tramos de puntos *GRADE* y tramos de puntos *VERTICAL_CURVE*, y que no existen dos tramos consecutivos del tipo *GRADE*, se procede a calcular las expresiones analíticas de las rectas que componen el diagrama de pendientes. Para ello se interpolan los puntos de la muestra correspondientes a cada tramo.

Si el método de interpolación elegido es el de rectas de área equivalente, se

procede de manera diferente según que el tramo sea de puntos *GRADE* o de puntos *VERTICAL_CURVE*. Si el tramo es de puntos *GRADE*, se calcula la recta de pendiente cero que encierra el mismo área que los puntos del tramo, lo que equivale a imponer que la diferencia de cota en los extremos del tramo sea la misma. Si el tramo de puntos es del tipo *VERTICAL_CURVE*, se calcula la recta que mejor aproxima los puntos por mínimos cuadrados y, a continuación, la recta paralela a esta que encierra el mismo área que los puntos de la muestra.

Si la forma de interpolación elegida es la de mínimos cuadrados, en lugar de la de las rectas de área equivalente, simplemente se calcula la recta que mejor aproxima por mínimos cuadrados los puntos del tramo considerado.

El resultado de este proceso es una serie de rectas del diagrama de pendientes, una para cada tramo de puntos del mismo tipo, cuyos extremos no guardan continuidad: el final de cada segmento no coincide con el principio del siguiente.

Se aplican dos procesos de mejora a las rectas del diagrama de pendientes obtenidas:

- En primer lugar, todas las rectas cuya pendiente sea menor que la pendiente límite considerada en el algoritmo, se sustituyen por la recta de pendiente exactamente igual a cero y que encierre el mismo área que la anterior.
- Se procede de manera iterativa hasta que no queden dos rectas horizontales consecutivas en el diagrama. Cuando así sucede, se sustituyen por una única recta (g'_1, g'_2) que encierre el mismo área que las dos rectas a las que sustituye (ver figura 5.7).

5.4.5 Ajuste del diagrama de pendientes

La situación en este momento es que se dispone de un diagrama de pendientes en el que no hay dos rectas horizontales consecutivas, y las rectas que son horizontales tienen pendiente exactamente igual a cero. El área encerrada bajo este diagrama de pendientes es la misma que la encerrada bajo la muestra de puntos original. En este diagrama de pendientes no hay continuidad: la pendiente del punto final de cada tramo no coincide con la pendiente del punto inicial del siguiente tramo.

Si se van tomando las rectas de este diagrama, excepto la primera, se pueden dar tres casos:

- *Caso I*: la recta estudiada es horizontal. En este caso, la recta situada a su izquierda será inclinada. Se sustituyen las dos rectas por otras dos. La recta de la izquierda se hace pasar por su extremo izquierdo y se varía su inclinación.

Fig. 5.7: Sustitución de dos rectas horizontales del diagrama de pendientes por una única recta (g'_1, g'_2) que encierre el mismo área

La recta bajo estudio se sigue imponiendo que sea horizontal. Se impone la condición de que el área encerrado por las dos nuevas rectas sea el mismo que el de las rectas originales (ver figura 5.8).

- *Caso II:* la recta estudiada es inclinada y la recta situada a su izquierda es horizontal. En este caso, la recta de la izquierda se deja invariable y la recta bajo estudio se sustituye por otra que en su extremo izquierdo tenga la misma pendiente que la recta de su izquierda y encierre el mismo área que la recta original (ver figura 5.9)
- *Caso III:* la recta estudiada y la recta situada a su izquierda son inclinadas. Se sustituyen las dos rectas por otras dos. La recta bajo estudio se sustituye por una paralela a la original. La recta a su izquierda se sustituye por otra que conserva su extremo izquierdo pero está girada respecto de la original. Se impone la condición de que ambas rectas coincidan en el punto de abscisa común y encierren el mismo área que las rectas originales (ver figura 5.10)

Al finalizar este proceso se dispone de un diagrama de pendientes que tiene continuidad, esto es, la pendiente en el extremo derecho de cada tramo es la misma que la del extremo izquierdo del tramo siguiente. Además, el área encerrada bajo el diagrama es la misma que bajo la muestra de puntos original.

Fig. 5.8: Sustitución por rectas de área equivalente en el diagrama de pendientes: caso I

Fig. 5.9: Sustitución por rectas de área equivalente en el diagrama de pendientes: caso II

5.4.6 Integración del diagrama dependientes

A partir del diagrama de pendientes obtenido en la fase anterior, se realiza la integración de las expresiones analíticas de las rectas obtenidas, para obtener las expresiones analíticas de las rasantes del perfil longitudinal. En esta integración, cuando la recta del diagrama de pendientes tiene una inclinación menor que la pendiente límite utilizada, se fuerza a que la integral resultante sea un polinomio de segundo grado con el término de la x^2 exactamente igual a cero. Como consecuencia de este proceso, puede suceder que queden dos rasantes de

Fig. 5.10: *Sustitución por rectas de área equivalente en el diagrama de pendientes: caso III*

pendiente constante consecutivas en el perfil longitudinal, sin una parábola entre ambas. Cuando así sucede, se actúa sobre el diagrama de pendientes, uniendo las dos rasantes en una única de área equivalente (ver figura 5.7). Este proceso se va repitiendo de manera iterativa hasta que no queden dos rasantes de pendiente constante en el perfil longitudinal sin una parábola que de continuidad a las pendientes.

El resultado final es el perfil longitudinal reconstruido de la carretera.

5.4.7 Parámetros que afectan a los resultados de la reconstrucción

Los resultados del algoritmo de reconstrucción dependen de varios parámetros. Por un lado están los parámetros relativos a la muestra de puntos: la precisión de la medida de las pendientes y la separación entre puntos de la muestra. Estos parámetros no dependen del algoritmo. En general, cuanto más precisas sean las medidas de las pendientes y cuanto más próximos estén los puntos de la muestra, el algoritmo será capaz de obtener reconstrucciones más precisas.

Por otro lado están los parámetros configurables que se utilizan en los cálculos descritos en los apartados anteriores: (1) la longitud mínima de las rasantes resultantes de los cálculos, (2) la longitud de las rectas de interpolación utilizadas en los distintos procesos del algoritmo de reconstrucción y (3) la pendiente límite para considerar que una recta del diagrama de pendientes es horizontal.

La longitud mínima de las rasantes resultantes de los cálculos afecta a la precisión del perfil resultante. Esta longitud mínima se utiliza para filtrar las

rasantes tras clasificar los puntos y agruparlos en tramos de puntos del mismo tipo.

La longitud de las rectas de interpolación tiene un límite inferior que es tomar sólo tres puntos de la muestra para calcular dichas rectas. El límite superior es configurable.

En cuanto a la pendiente límite, como se comentó anteriormente, la inclinación de las rectas del diagrama de pendientes que corresponden a acuerdos parabólicos es $1/K_v$, siendo K_v el parámetro de la parábola. Por tanto, la pendiente límite tiene que ser menor que la resultante del máximo valor absoluto del parámetro K_v de las parábolas que se quieran identificar. El valor de la pendiente límite actúa como un parámetro que define la sensibilidad del algoritmo. Se puede ver con un ejemplo. Considérese el perfil longitudinal siguiente:

Vertical Profile

	SE	ZE	PE	L	K
	0,000000	1000,000000	0,060000	1050,000000	-
	1050,000000	1063,000000	0,060000	500,000000	-50000,0
	1550,000000	1090,000000	0,050000	1100,000000	-55000,0
	2650,000000	1134,000000	0,030000	750,000000	-

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pdte entrada; L=Long; K=Parám

Se trata de un perfil compuesto por cuatro rasantes: la primera es una rampa con una inclinación del 6 ‰ y una longitud de 1050 m; la segunda es un acuerdo parabólico convexo de parámetro $K_v = -50000$ y longitud 500 m; la tercera es otro acuerdo parabólico de parámetro $K_v = -55000$ y longitud 1100 m; la última alineación es una rampa de inclinación 3 ‰ y longitud 750 m.

En el diagrama de pendientes, el primer acuerdo parabólico estará representado por una recta que formará un ángulo α_1 con el eje de abscisas y cuya inclinación será:

$$tg(\alpha_1) = \frac{1}{K_{v1}} = \frac{1}{-50000} = -2 \times 10^{-5} \quad (5.12)$$

El segundo acuerdo parabólico estara representado en el diagrama de pendientes por una recta que formará un ángulo α_2 con el eje de abscisas y cuya inclinación será:

$$tg(\alpha_2) = \frac{1}{K_{v2}} = \frac{1}{-55000} = -1.82 \times 10^{-5} \quad (5.13)$$

Si se denomina α_3 al menor ángulo que forman las dos rectas, su valor será:

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (5.14)$$

Donde el orden de los ángulos en la parte derecha de la igualdad se ha escogido para que el resultado sea positivo. La tangente de este ángulo valdrá:

$$tg(\alpha_3) = tg(\alpha_2 - \alpha_1) = \frac{tg(\alpha_2) - tg(\alpha_1)}{1 + tg(\alpha_2)tg(\alpha_1)} \quad (5.15)$$

Entrando en la expresión 5.15 con los valores de $tg(\alpha_1)$ y $tg(\alpha_2)$ dados por las expresiones 5.12 y 5.13 se obtiene:

$$tg(\alpha_3) = \frac{-(2 \times 10^{-5} - 1.8 \times 10^{-5})}{1 + 2 \times 10^{-5} \cdot 1.8 \times 10^{-5}} = \frac{-(2 \times 10^{-5} - 1.8 \times 10^{-5})}{1 + 3.6 \times 10^{-10}} \quad (5.16)$$

En el denominador de esta última expresión, el segundo término del denominador de valor 3.6×10^{-10} es próximo a cero, por lo que, en el rango de valores de pendientes a los que dan lugar los parámetros K_v de los acuerdos parabólicos, se puede hacer la aproximación siguiente:

$$tg(\alpha_3) \simeq tg(\alpha_2) - tg(\alpha_1) \quad (5.17)$$

A la vista de la expresión 5.17, para que el programa pueda identificar como diferentes los acuerdos de parámetros K_{v1} y K_{v2} , la pendiente límite tendrá que cumplir la siguiente condición:

$$tg(\alpha_{lim}) < |tg(\alpha_2) - tg(\alpha_1)| = \left| \frac{1}{K_{v1}} - \frac{1}{K_{v2}} \right| \quad (5.18)$$

En el ejemplo que se está analizando, esta condición se traducirá en:

$$tg(\alpha_{lim}) < |2 \times 10^{-5} - 1.8 \times 10^{-5}| = 2 \times 10^{-6} \quad (5.19)$$

Si se utiliza una pendiente límite mayor que la dada por la expresión 5.19, el algoritmo no será capaz de discernir entre los dos acuerdos parabólicos, y los interpretará como un único acuerdo. En el ejemplo, el perfil longitudinal que se obtiene de la reconstrucción cuando se utiliza una pendiente límite $\alpha_{lim} = 1 \times 10^{-5}$, superior a la sensibilidad requerida, el algoritmo reconstruye el perfil con un único acuerdo. El resultado es el siguiente:

Vertical Profile (pdtelim = 1e-5)

SE	ZE	PE	L	K
0,000000	1000,000000	0,060000	1050,000000	-
1050,000000	1063,000000	0,060000	1600,000000	-52766,0
2650,000000	1134,741935	0,029677	750,000000	-

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pdte entrada; L=Long; K=Parám

Por el contrario, cuando se utiliza una pendiente límite de valor $\alpha_{lim} = 1 \times 10^{-6}$, que es menor que la sensibilidad requerida, el algoritmo sí que identifica los dos acuerdos. En este caso el resultado es el siguiente:

Vertical Profile (pdtelim = 1e-6)

SE	ZE	PE	L	K
0,000000	1000,000000	0,060000	1050,000000	-
1050,000000	1063,000000	0,060000	500,000000	-50000,0
1550,000000	1090,500000	0,050000	1100,000000	-55000,0
2650,000000	1134,500000	0,030000	750,000000	-

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pdte entrada; L=Long; K=Parám

El programa de reconstrucción se puede ejecutar una sola vez, fijando el valor de la longitud de las rectas de interpolación y de la pendiente límite, como se ha hecho para resolver el ejemplo anterior. Pero también permite ejecutarse de forma iterativa, de manera que el propio programa determine los mejores valores para los dos parámetros. Para ello, lo que hace el programa en la reconstrucción de cada perfil es probar todas las longitudes de rectas de interpolación con valores entre la correspondiente a tomar tres puntos de la muestra y la resultante de tomar tantos puntos de la muestra como sean necesarios para llegar a la longitud máxima elegida. Para cada longitud de rectas de interpolación, prueba la reconstrucción con trece valores de la pendiente límite espaciados entre 1×10^{-4} y 1×10^{-7} , que corresponderían, respectivamente, a valores del parámetro K_v comprendidos entre diez mil y diez millones:

$$1 \times 10^{-4}, 1.75 \times 10^{-5}, 1.5 \times 10^{-5} \dots 1.0 \times 10^{-7}$$

En cada iteración, el programa calcula el error cuadrático medio que se produce entre las cotas del perfil longitudinal obtenidas por integración numérica de las pendientes de la muestra, y las cotas procedentes de las expresiones analíticas de las rasantes del perfil longitudinal reconstruido. El resultado que arroje un error cuadrático medio menor es la combinación de parámetros seleccionada para la reconstrucción del perfil. La colección de trece valores de pendientes límite también es configurable, pudiendo hacerse mayor o menor o simplemente variar alguno de los valores de la colección.

5.5 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DESARROLLADO

El algoritmo de reconstrucción está implementado mediante un programa desarrollado en lenguaje Java versión 1.8. Se trata de un programa complejo compuesto por más de 16500 líneas de código repartidas en 148 ficheros. Permite gestionar la entrada y salida de datos con ficheros CSV, el establecimiento de los diferentes parámetros opcionales, el procesamiento mediante los algoritmos de reconstrucción y la salida de resultados alfanumérica y gráfica, tanto por pantalla como mediante la exportación a ficheros reutilizables desde hojas de cálculo u otros softwares. El programa implementa también el generador de perfiles sintéticos aleatorios y numerosas utilidades para el tratamiento de los ficheros procedentes de los dispositivos GNSS. El programa está desarrollado inicialmente bajo el sistema operativo Linux, pero se puede ejecutar en cualquier sistema operativo que disponga de lenguaje Java, como Windows o iOS.

El programa utiliza cuatro librerías de software libre para resolver algunas de sus funciones:

- *junit*: el programa de reconstrucción se ha desarrollado siguiendo la metodología de *Test Driven Development*. La librería *junit* se utiliza para la creación de tests unitarios que permiten monitorizar todas las funciones del programa a medida que se avanza en su desarrollo (*Gamma and Beck*, 2014).
- *opencsv*: es una librería que proporciona funciones para entrada y salida de ficheros en formato CSV (*Miller et al.*, 2009).
- *log4j*: es una librería de la Fundación Apache Software que permite la salida de mensajes en la consola del programa durante la ejecución del mismo, informando de resultados parciales, incidencias y errores (*The ApacheSoftware Foundation*, 2015).
- *JFreeChart*: es una librería destinada a la realización de gráficos de funciones bajo entornos Java (*Gilbert*, 2000).

Se describen a continuación las características principales del programa.

- *Entrada de datos*: la entrada de los datos correspondientes a los valores (s_i, g_i) de los puntos del eje se hacen a través de un fichero en formato CSV. Si los datos provienen de dispositivos GNSS u otros que proporcionen coordenadas (x, y, z) , el programa dispone de utilidades que le permiten generar los ficheros con las coordenadas (s, z) y (s, g) que se requieren como entrada a los algoritmos.
- *Gestión de funciones discretas*: todos los datos y resultados tienen la forma de funciones discretas, esto es, de funciones del tipo $y_i = f(x_i)$ de las que se

conocen una colección discreta de valores (x_i, y_i) . El programa proporciona una clase específica que permite gestionar todas las operaciones que se llevan a cabo sobre este tipo de colecciones de valores.

- *Integración numérica*: el programa proporciona funciones para la integración numérica de funciones discretas en la forma $y_i = f(x_i)$.
- *Derivación e integración analítica*: hay funciones específicas que realizan la derivación e integración analítica de polinomios de hasta segundo grado.
- *Sistemas de ecuaciones lineales*: el programa proporciona una función específica para resolver sistemas de ecuaciones lineales.
- *Aproximaciones por mínimos cuadrados*: mediante funciones específicas, se pueden calcular la recta y la parábola que mejor aproximan por mínimos cuadrados una colección de puntos (x_i, y_i) .
- *Creación de gráficos*: hay funciones para la visualización de gráficos que representen una o más funciones de la forma $y_i = f(x_i)$. Los gráficos generados permiten la realización de zoom, la consulta de información en cada punto de la gráfica de la función y la exportación a ficheros gráficos.
- *Generación de perfiles sintéticos*: el programa incluye un módulo para la generación de perfiles sintéticos adaptados a la normativa de carreteras y con parámetros aleatorios. Este módulo se explica en el siguiente apartado.
- *Utilidades para trazas GNSS*: el programa incluye varias utilidades para gestionar trazas procedentes de los dispositivos GNSS, como la generación de ficheros (s, z) y (s, g) , ya mencionada, el cálculo del eje de la carretera promediando varias trazas, la inversión de las trazas en sentido descendente del kilometraje para convertirlas al sentido ascendente, visualización del perfil longitudinal de la traza y otras.

El programa está disponible como software libre bajo licencia *Creative Commons Atribución-Compartir Igual 3.0 España (CC BY-SA 3.0 ES)*.

El texto completo de la licencia se puede consultar en la siguiente dirección:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/legalcode.es>

El código fuente del programa se puede consultar y descargar en el repositorio público del autor en la plataforma *GitHub*, en la siguiente dirección:

<https://github.com/shiguera/profilegenerator>

5.6 GENERADOR DE PERFILES SINTÉTICOS

Con el fin de optimizar y calibrar los algoritmos incluidos en el programa de reconstrucción, se ha desarrollado un módulo específico que permite generar perfiles sintéticos de carreteras con parámetros aleatorios. Los parámetros que utilizan las distintas rasantes generadas son configurables, de forma que se puedan establecer valores máximos y mínimos para ellos. De esta manera es posible forzar que los perfiles generados se adapten a diferentes normativas de carreteras y también que se puedan generar perfiles con tipologías de carreteras específicas. Por ejemplo, es posible imponer que las inclinaciones de rampas y pendientes, o los parámetros de los acuerdos parabólicos estén comprendidos entre determinados valores y con ello conseguir perfiles de carreteras preferentemente llanas o preferentemente abruptas.

La utilización de perfiles sintéticos generados por ordenador ofrece algunas ventajas a la hora de calibrar y ajustar los algoritmos. Una de las ventajas es la posibilidad de generar perfiles con sucesiones de acuerdos verticales cuyos parámetros tengan valores próximos, y con ello comprobar la sensibilidad de los algoritmos según se utilicen unos u otros procedimientos de cálculo. Ello ha permitido ir afinando el desarrollo del programa de reconstrucción, lo que hubiera sido imposible de utilizar sólo los datos de carreteras reales de que se disponía.

Otra ventaja de la utilización de los perfiles sintéticos es que se conocen las expresiones analíticas exactas del perfil longitudinal que se pretende reconstruir, haciendo posible la medición de errores que no es posible medir con los perfiles reales de carreteras. Este es el caso de la posición del punto exacto donde comienzan o terminan las rasantes. En las pruebas realizadas sobre carreteras reales, la medición de los errores se ha hecho en base a la diferencia entre las cotas de los puntos del perfil reconstruido y las cotas de los puntos de la carretera. Pero no es posible conocer las expresiones analíticas exactas de las rasantes ni la posición exacta de los puntos frontera entre rasantes. En las pruebas realizadas sobre perfiles sintéticos, sí que se pueden medir los errores en relación con las rasantes generadas o con las posiciones exactas de los puntos singulares entre rasantes. De hecho, así se ha hecho y dicha medición de errores se ha utilizado para afinar los desarrollos matemáticos de los algoritmos de reconstrucción.

Por último, otra ventaja adicional de la utilización de perfiles sintéticos es la posibilidad de realizar ensayos de reconstrucción sobre un número muy elevado de perfiles. En este estudio se han llevado a cabo ensayos sobre 120000 perfiles aleatorios, lo que ha permitido extraer conclusiones de máximo valor para el desarrollo del procedimiento de reconstrucción.

Fig. 5.11: Perfiles sintéticos tipo considerados en las series de ensayos

La normativa española de carreteras fija el valor máximo que puede tener la pendiente, según el tipo de carretera de que se trate. También fija su valor mínimo, de forma que no se produzcan problemas de drenaje. En este sentido, la pendiente mínima establecida es del 0,5 % (*Ministerio de Fomento, 2016*).

Las normativas de carreteras también pueden fijar limitaciones para las longitudes máximas y mínimas de las rasantes verticales. En la normativa española, por ejemplo, se fija la longitud máxima que pueden tener los tramos de fuerte inclinación (*Ministerio de Fomento, 2016*).

En los perfiles sintéticos que se han generado para este estudio se han establecido unos valores máximos y mínimos para las pendientes, longitudes y para el parámetro K_v que se utilizaban para generar las rasantes aleatorias. Entre estos valores máximos y mínimos, los parámetros aleatorios de las rasantes se generaron siguiendo una distribución uniforme.

El programa genera diez perfiles tipo diferentes. Los perfiles tipo constan de dos tramos de pendiente constante, positiva o negativa, enlazados por (1) un acuerdo parabólico simple, cóncavo o convexo, o (2) enlazados por dos acuerdos parabólicos consecutivos, con parámetros del mismo signo o de signo contrario. El primer caso corresponde a los acuerdos parabólicos simples. El segundo caso corresponde a los casos de dos acuerdos parabólicos convexos con diferente K_v consecutivos, dos acuerdos parabólicos cóncavos con diferente K_v consecutivos, o a la sucesión de un acuerdo cóncavo seguido de uno convexo o de un acuerdo convexo seguido de uno cóncavo. La descripción de los perfiles tipo utilizados por el generador de perfiles se puede ver en la figura 5.11 y se detalla a continuación:

1. **Tipo I:** Un acuerdo convexo que enlaza una alineación en rampa con otra alineación en pendiente
2. **Tipo IIa:** Dos rasantes en pendiente enlazadas mediante un acuerdo convexo
3. **Tipo IIb:** Dos rasantes en rampa enlazadas mediante un acuerdo convexo
4. **Tipo III:** Un acuerdo cóncavo que enlaza una alineación en pendiente con otra alineación en rampa
5. **Tipo IVa:** Dos rasantes en rampa enlazadas mediante un acuerdo cóncavo
6. **Tipo IVb:** Dos rasantes en pendiente enlazadas mediante un acuerdo cóncavo
7. **Tipo V:** Dos acuerdos convexos consecutivos con diferente parámetro K_v que enlazan dos rasantes en rampa
8. **Tipo VI:** Dos acuerdos cóncavos consecutivos con diferente parámetro K_v que enlazan rasantes en pendiente.
9. **Tipo VII:** Dos rasantes en rampa enlazadas mediante la sucesión de un acuerdo convexo seguido de un acuerdo cóncavo.
10. **Tipo VIII:** Dos rasantes en pendiente enlazadas mediante la sucesión de un acuerdo cóncavo seguido de un acuerdo convexo.

La generación de perfiles sintéticos comprende varios procesos (ver figura 5.12):

1. Generación de las expresiones analíticas de las rasantes del perfil aleatorio correspondiente a uno de los tipos descritos
2. Derivación de las expresiones analíticas obtenidas para obtener las expresiones analíticas de las rectas que forman el diagrama de pendientes del perfil longitudinal
3. Obtención de una muestra de puntos (s_i, g_i) del diagrama de pendientes, con una distancia entre puntos sucesivos determinada. Esta muestra de puntos es la que se pasa al programa de reconstrucción, para que realice su trabajo
4. El programa de reconstrucción calcula las expresiones analíticas de las rectas que forman el diagrama de pendientes
5. El programa de reconstrucción integra las ecuaciones analíticas obtenidas en

el paso anterior, para obtener las expresiones analíticas de las rasantes del perfil longitudinal

6. Comparando las expresiones analíticas del perfil longitudinal reconstruido que devuelve el programa de reconstrucción con las del perfil longitudinal original, se calculan los errores que se han cometido

Fig. 5.12: Esquema de las fases que comprende la realización de cada ensayo sobre un perfil sintético

5.7 ENSAYOS CON PERFILES SINTÉTICOS

Para cada uno de los perfiles tipo definidos, se han realizado ensayos para muestras (s_i, g_i) que tenían separaciones entre puntos de 1, 2, 5 y 10 metros. Se pretendía con ello analizar la influencia de la separación entre puntos para la precisión de la reconstrucción. También se pretendía simular que los datos se habían recogido con distintos equipos, o con el mismo equipo recorriendo la carretera a diferentes velocidades.

Para cada muestra con diferente distancia entre puntos, se probó el algoritmo de

reconstrucción utilizando rectas de interpolación formadas por 3, 6 u 11 puntos, lo que dio lugar a rectas de interpolación con longitudes comprendidas entre 2 y 100 m (ver tabla 5.1).

De esta forma, para cada uno de los 10 tipos de perfil, se realizaban 12 series de ensayos. Cada serie constaba de 1000 perfiles aleatorios, cuya geometría se reconstruyó y se midieron los errores cometidos. El número total de ensayos realizados fue de 120000.

Los parámetros geométricos de las rasantes se generaron de manera aleatoria, según una distribución uniforme entre los siguientes valores absolutos máximos y mínimos:

- Pendiente mínima de las rasantes: 0,5 %
- Pendiente máxima de las rasantes: 10 %
- Longitud mínima de las rasantes: 50 m
- Longitud máxima de las rasantes: 1500 m
- Valor mínimo del parámetro K_v en acuerdos parabólicos : 200 m
- Valor máximo del parámetro K_v en acuerdos parabólicos: 60 000 m

Tabla 5.1: Distancias entre puntos de las muestras y rectas de interpolación utilizadas en los ensayos sobre perfiles sintéticos para cada tipo de perfil

Distancia entre puntos	Rectas de interpolación	
	Número de puntos	Longitud (m)
1	3	2
2	3	4
5	3	10
10	3	20
1	6	5
2	6	10
5	6	25
10	6	50
1	11	10
2	11	20
5	11	50
10	11	100

5.7.1 Cálculo de errores

En cada ensayo realizado, se compararon las rasantes resultantes con las rasantes del perfil sintético original generado de manera aleatoria. Si las rasantes del perfil reconstruido coincidían en número, tipo y orden con las del perfil original, la reconstrucción se daba por buena. En otro caso, la reconstrucción se consideraba fallida.

En todos los ensayos, resultaran acertados o fallidos, se calculó el error cuadrático medio entre las cotas de los puntos del perfil reconstruido y las de los puntos del perfil original. En los ensayos en los que la reconstrucción del perfil se daba por buena, esto es, cuando el número de rasantes del perfil reconstruido coincidía en número, tipo y orden con las del perfil original, se calculó además el error cometido en la determinación de los puntos frontera entre rasantes. Para ello se calculó el valor absoluto de la distancia entre los puntos frontera de las rasantes del perfil longitudinal reconstruido y los puntos correspondientes del perfil original. Para cada serie de 1000 ensayos correspondientes a un tipo de perfil, una distancia entre puntos y una longitud de las rectas de interpolación, se calcularon valores agregados del error cometido en la determinación de los puntos frontera entre rasantes: la media, la desviación típica y los valores máximo y mínimo.

5.7.2 Análisis de resultados

Como se ha comentado anteriormente, hay dos tipos de parámetros que afectan a la calidad del resultado de la reconstrucción:

- Parámetros que dependen del procedimiento y de los equipos utilizados en la toma de datos: la distancia entre puntos de la muestra y la precisión de la medida de las pendientes.
- Parámetros configurables del algoritmo de reconstrucción y que afectan al resultado obtenido: la pendiente límite utilizada para identificar las rectas horizontales y la longitud de las rectas de interpolación.

En el caso de los ensayos realizados con perfiles sintéticos, como las muestras de puntos se extraen de las expresiones analíticas exactas de las rasantes, no existe error en la medida de las pendientes, los valores de las pendientes g_i de la muestra son valores exactos y sin error de medida. Por lo tanto, en los ensayos sobre perfiles sintéticos, dicho parámetro no afecta al análisis de los resultados obtenidos.

En los ensayos realizados se comprueba que la distancia entre los puntos de la muestra tiene mucha importancia en la calidad de los resultados de la reconstrucción. Cuanto menor es la separación entre los puntos de la muestra,

Fig. 5.13: Media del valor absoluto del error en la determinación de los puntos frontera entre rasantes en los ensayos sobre perfiles de los tipos I a IV, con rectas de interpolación formadas por tres puntos

mayor es la precisión con la que se determina la posición de los puntos frontera entre rasantes. Como en estos ensayos se han considerado rasantes con una longitud mínima de 50 m , se comprueba que distancias entre puntos superiores a 10 m daban lugar a mayor número de reconstrucciones fallidas. Con separaciones de puntos superiores a 10 m , las rectas de interpolación con más de cuatro puntos tienen una longitud mayor que las rasantes que se pretende identificar.

Las figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16 reflejan la influencia de la separación entre los puntos de la muestra y la determinación de la posición de los puntos frontera entre rasantes. Los resultados obtenidos muestran que separaciones de puntos entre 2 y 5 m proporcionan resultados de la reconstrucción cuyo error cuadrático medio es próximo a cero. En estos casos, la distancia en valor absoluto entre los puntos frontera de las rasantes del perfil reconstruido y los de las rasantes del perfil original se mantienen en torno al 30% de la distancia entre los puntos de la muestra. Estas distancias entre puntos de la muestra es posible obtenerla con la instrumentación existente, ya sean dispositivos GNSS o clinómetros.

En los ensayos realizados se ha comprobado también que una mayor longitud

Fig. 5.14: Máximo del valor absoluto del error en la determinación de los puntos frontera entre rasantes en los ensayos sobre perfiles de los tipos I a IV, con rectas de interpolación formadas por tres puntos

de las rectas de interpolación no tiene por qué dar lugar a mayor precisión en los resultados de la reconstrucción. El algoritmo se basa en interpretar el entorno próximo al punto. Cuando las rectas de interpolación son demasiado largas, se producen errores en la clasificación de algunos puntos. Como ya se ha indicado, la mínima longitud de rectas de interpolación que es posible utilizar en el algoritmo de reconstrucción es la correspondiente a tomar tres puntos para esas líneas: el punto que se quiere clasificar y los dos puntos anteriores o posteriores al mismo. En este caso la longitud de las rectas de interpolación será dos veces la distancia entre los puntos de la muestra.

Si en lugar de tomar tres puntos para las rectas de interpolación se toman más, se obtendrán rectas de interpolación de mayor longitud. Se ha comprobado que, para reducir el número de reconstrucciones fallidas, hay que utilizar rectas de interpolación con longitudes máximas en torno al 50 % de la longitud mínima de las rasantes que se pretende reconstruir.

En las series de ensayos realizadas se utilizaron rasantes con una longitud mínima 50 m. Se comprobó que cuando la longitud de las rectas de interpolación

Fig. 5.15: Media del valor absoluto del error en la determinación de los puntos frontera entre rasantes en los ensayos sobre perfiles de los tipos V a VIII, con rectas de interpolación formadas por tres puntos

era de 25 m, se obtenían un 5 % de reconstrucciones fallidas. Cuando la longitud de las rectas de interpolación se aumentaba hasta los 50 m, el porcentaje de reconstrucciones fallidas aumentaba hasta el 10 %. Cuando las longitudes de las rectas de interpolación se aumentaban hasta los 100 m, el porcentaje de reconstrucciones fallidas era del 100 % en la mayoría de las series de ensayos.

La longitud de las rectas de interpolación, unida al número de puntos de la muestra, afectan al tiempo de computación que necesita el algoritmo para la reconstrucción de cada perfil, aunque en las pruebas realizadas nunca se sobrepasaron algunos segundos.

En relación con el valor de la pendiente límite, en el apartado 5.4.7 ya se comentó su influencia en cuanto a la sensibilidad del algoritmo para identificar los acuerdos parabólicos. Podría pensarse que lo mejor es coger siempre el valor más pequeño posible de la pendiente límite, pero esto no es así. Cuanto menor sea el valor de la pendiente límite, mayor es el número de puntos en la proximidad de los puntos frontera entre rasantes que se interpretan a su vez como puntos frontera sin serlo. Es lo que se daría en llamar «falsos positivos» del algoritmo de

Fig. 5.16: *Máximo del valor absoluto del error en la determinación de los puntos frontera entre rasantes en los ensayos sobre perfiles de los tipos V a VIII, con rectas de interpolación formadas por tres puntos*

reconstrucción. En general, los mejores resultados en las reconstrucciones se obtienen mediante una combinación adecuada entre los valores de la pendiente límite y la longitud de las rectas de interpolación.

En los ensayos realizados sobre perfiles sintéticos se utilizaron valores de la pendiente límite comprendidos entre 1×10^{-5} y 1×10^{-6} . Se comprobó, que los mejores resultados de las reconstrucciones se obtuvieron con pendientes límite de 1×10^{-6} y rectas de interpolación de longitud igual o inferior a 10 m.

Las figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16 resumen los resultados de los ensayos realizados con separaciones de puntos en la muestra de 1, 2, 5 y 10 m, y rectas de interpolación formadas por tres puntos, lo que da lugar a rectas de interpolación de longitudes 2, 4, 10 y 20 m, respectivamente. En las figuras, en el eje de abscisas se ha representado la distancia entre puntos y en el eje de ordenadas el error medio o el error máximo cometido en la determinación de los puntos frontera entre rasantes, dividido en cada caso por la separación de los puntos de la muestra, para cada serie de ensayos y cada tipo de perfil. Se puede observar que el error medio en la determinación de los puntos frontera se mantiene constante en torno al

25 – 30 % de la distancia entre puntos de la muestra. El valor máximo del error, en cambio, crece con la distancia entre los puntos de la muestra, desde un valor en torno al 50 % hasta un valor del 80 % de dicha distancia.

En relación con el error cuadrático medio entre las cotas de los puntos de los perfiles reconstruidos y las de los puntos del perfil original, se mantuvo por debajo de 1×10^{-3} en todos los casos en los que la reconstrucción se consideró correcta, según el criterio expuesto anteriormente.

5.8 ENSAYOS CON EL PERFIL LONGITUDINAL DEL PROYECTO

La M-607 es una carretera española, de titularidad autonómica, que une Madrid con el puerto de Navacerrada. Es autovía entre Madrid y Colmenar Viejo y posteriormente continúa como carretera convencional hasta el puerto de Navacerrada. Se ha ensayado el tramo de 12 km entre Colmenar Viejo y Cerceda, desde el PK-36 hasta el PK-48. En este tramo, la carretera es de calzada única y dispone de dos carriles de 3,5 m de anchura, uno para cada sentido de circulación, y arcones de 2,5 m anchura. En la figura 5.17 se puede ver el plano de situación del tramo ensayado.

5.8.1 Toma de datos

En el caso de la carretera M-607 se disponía de las rasantes del proyecto del tramo entre Colmenar Viejo y Cerceda. El ensayo realizado sobre el perfil de proyecto de la M-607 es similar al tipo de ensayos realizados sobre perfiles sintéticos, pero también guarda similitud con los ensayos realizados sobre carreteras reales, por lo que se ha decidido ponerlo en un apartado específico. Se utiliza también este apartado para describir las columnas de las tablas resumen de datos y resultados que se van a utilizar en todos los ensayos con datos de carreteras reales. En el apartado 5.10 se realizarán comparaciones entre las rasantes del proyecto con las obtenidas por el algoritmo de reconstrucción.

El perfil de proyecto no se corresponde exactamente al perfil actual de la carretera, pues la carretera ha tenido modificaciones del trazado en algunos puntos, pero las modificaciones son de pequeña magnitud y el perfil puede servir para hacer algunas comparaciones.

El estado de rasantes del proyecto se puede consultar en el anexo C. Consta de 32 rasantes verticales de pendiente constante y 33 acuerdos parabólicos. Los parámetros de los acuerdos varían entre un máximo de 15000 m y un mínimo de

Fig. 5.17: Carretera M-607, tramo entre Colmenar Viejo y Cerceda. Plano de situación

3000 m, en valor absoluto. La longitud de las rasantes varía entre un máximo de 663 m y un mínimo de 1,68 m. Esta última alineación tan corta, que corresponde a una pendiente de inclinación -1,8% situada en el PK37+300, entre un acuerdo convexo de $K_v=-7000$ m y uno cóncavo de $K_v=10\,000$ m, sirvió para probar el algoritmo en esta situación límite.

5.8.2 Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos consistió, en primer lugar, en derivar las expresiones analíticas de las rasantes del perfil longitudinal, para obtener las del diagrama de pendientes. De estas rasantes del diagrama de pendientes, se extrajo una muestra de puntos, (s_i, g_i) , espaciados un metro, que es la que se utilizó como entrada del algoritmo de reconstrucción. Todos estos procesos los realizan distintas utilidades del programa de reconstrucción.

En la tabla 5.2 se pueden ver los datos de la muestra de pendientes, (s_i, g_i) , utilizada para el ensayo. Las columnas que aparecen en la tabla son las siguientes:

- **ID:** Número identificativo del ensayo, para poder referirse a él e identificarlo en

la tabla 5.3, que da los resultados de los ensayos

- **Carretera:** Carretera a la que corresponde la traza, con indicación del sentido de recorrido
- **Datos:** Fuente de datos para el fichero (s_i, g_i) procesado
- **L:** Longitud en metros del tramo reconstruido
- **Puntos:** Número de puntos de que consta la traza ensayada
- **Sep:** Separación media de los puntos de la traza

Tabla 5.2: Descripción del ensayo de reconstrucción en la carretera M-607 con datos del perfil longitudinal del proyecto

ID	Carretera	Datos	Traza		
			L (m)	Puntos	Sep (m)
1	M-607 Ascendente	Traza completa Proyecto	12663,91	12665	1,0

5.8.3 Presentación de resultados y cálculo de errores

Para calcular los errores se utilizó una metodología similar a la utilizada con los perfiles sintéticos, pues en esta ocasión sí se conocen las rasantes del proyecto y la posición exacta de los puntos frontera. Se hicieron las siguientes comprobaciones con el estado de rasantes del perfil reconstruido:

- *Número total de rasantes:* se comprobó que el perfil reconstruido tenía 65 rasantes
- *Tipo de las rasantes:* se comprobó que las rasantes del perfil reconstruido eran del mismo tipo y estaban en el mismo orden que las del perfil original
- *Error en los puntos frontera:* se calculó el error medio cometido en la distancia en horizontal entre los puntos frontera de las rasantes del perfil reconstruido y los de las rasantes del perfil original. Este error resultó ser de 0.74 m, en línea con las conclusiones de los ensayos sobre perfiles sintéticos para una separación de puntos de 1 m

Además, se calcularon los errores de la misma forma que en el resto de ensayos sobre carreteras reales. La tabla 5.3 resume los resultados obtenidos. Las columnas que aparecen en la tabla son las siguientes:

- **ID:** Número identificativo del ensayo, para poder referirse a él e identificarlo en la tabla 5.2, que describe las características de cada traza

- **L:** Longitud de las rectas de interpolación seleccionadas por el algoritmo de reconstrucción para minimizar errores
- **Pdte:** Pendiente límite seleccionada por el algoritmo de reconstrucción
- **Kvmax:** Parámetro Kv máximo equivalente a la pendiente límite utilizada. Su valor es el inverso de la pendiente límite. Marca la sensibilidad de la reconstrucción en la identificación de los acuerdos. Los acuerdos parabólicos cuyo parámetro Kv sea mayor en valor absoluto que este valor, no podrán ser identificados por el algoritmo
- **G:** Número de rasantes de inclinación constante, rampas o pendientes, que componen el perfil longitudinal reconstruido
- **VC:** número de acuerdos parabólicos que componen el perfil longitudinal reconstruido
- **ECM:** Error cuadrático medio del error en las cotas del perfil reconstruido respecto de las cotas del perfil procedente de la integración numérica de las pendientes
- **Var:** Desviación típica del error anterior
- **Med:** Media del valor absoluto del error entre la cota de los puntos del perfil reconstruido y la de los puntos del perfil procedente de la integración numérica de las pendientes
- **Max:** Valor máximo del error anterior

Tabla 5.3: Resultados del ensayo de reconstrucción en la carretera M-607 con datos del perfil longitudinal del proyecto

ID	R. Interpol			Rasantes			Errores		
	L(m)	Pdte(m)	Kvmax(m)	G	VC	ECM	Desv	Media(m)	Max(m)
1	3,0	$6,5 \times 10^{-5}$	15385	32	33	0,0015	0,0193	0,0329	0,0904

El análisis de los resultados de la tabla 5.3 arroja una primera conclusión importante: si los datos de entrada al algoritmo son precisos, los errores de la reconstrucción son prácticamente despreciables. Esto indica que el algoritmo trabaja de manera adecuada, que es la calidad de los datos de entrada la que limita la precisión que se obtiene en la reconstrucción. Esta afirmación se podrá corroborar más adelante con los ensayos realizados en carreteras reales con diferentes dispositivos.

La tabla 5.3 muestra algunos datos interesantes:

- La pendiente límite seleccionada por el algoritmo de reconstrucción es $6.5 \times$

10^{-5} , que equivale a una sensibilidad en los parámetros Kv de los acuerdos reconstruidos de 15385 m. El máximo parámetro de las rasantes del perfil es 15000 m, por lo que el método iterativo selecciona de manera correcta la sensibilidad que necesita el algoritmo para minimizar errores.

- El error medio en la medida de la altitud es de 3,3 cm, y el error máximo cometido en algún punto 9,0 cm. Son errores prácticamente despreciables.

Fig. 5.18: Resultados del ensayo de reconstrucción en la carretera M-607 con datos del perfil longitudinal del proyecto. Diagrama de pendientes

El estado de rasantes del perfil reconstruido y la salida completa de resultados del ensayo se puede consultar en el anexo C. La pequeña alineación de 1.8 m de longitud del perfil original se reconstruye mediante una alineación de 5 m de longitud y pendiente -1.7% . El algoritmo no es capaz de reconstruir rasantes que midan menos que la distancia entre tres puntos consecutivos de la muestra, que en este caso serían 2 m.

Las figura 5.18 muestra la comparación entre el diagrama de pendientes original y el reconstruido. La figura 5.19 muestra la comparación entre los perfiles longitudinales. En los gráficos no es posible distinguir la línea del proyecto, ya que queda sobrescrita con la línea de la reconstrucción. Esto da idea del reducido valor de los errores.

Fig. 5.19: Resultados del ensayo de reconstrucción en la carretera M-607 con datos del perfil longitudinal del proyecto. Perfil longitudinal

5.9 ENSAYOS CON DATOS DE CLINÓMETROS

Se ha ensayado la reconstrucción a partir de datos de pendientes tomados con clinómetros. Los datos proceden del inventario de carreteras nacionales del año 2008 y de la carretera M-607 de titularidad autonómica. La tabla 5.4 resume los datos de los cinco tramos ensayados. Se han elegido tramos de carreteras con diferente tipología del relieve (llano, ondulado y montañoso), de forma que se pueda valorar el funcionamiento del algoritmo de reconstrucción para diferentes rangos de los parámetros de los acuerdos parabólicos. El tramo de 50 km de longitud de la M-607 sirvió para valorar la capacidad del algoritmo en el tratamiento de tramos de gran longitud.

5.9.1 Toma de datos

La toma de datos en los tramos correspondientes al inventario del año 2008, según describe el Manual de criterios del inventario (*Ministerio de Fomento, 2009a*), se realizó siguiendo los siguientes criterios:

- Velocidad media de recorrido 65 km/h
- Sentido de recorrido: En kilometración creciente, excepto los de doble calzada en los que se efectúa en ambos sentidos

Tabla 5.4: *Tramos de carretera ensayados a partir de datos tomados con clinómetros.*

Carretera	Provincia	Inicio		Fin		L (Km)	Terreno
		PK	Localidad	PK	Localidad		
M-607	Madrid	8	Madrid	58	Navacerrada	50	Ondulado
M-607	Madrid	36	Colmenar Viejo	48	Cerceda	12	Ondulado
N-320	Madrid	333	Torrelaguna	341	Venturada	8	Ondulado
N-403	Toledo	5	Toledo	20	Rieves	15	Llano
N-403	Ávila	96	C. del Burguillo	108	El Barraco	12	Montañosos

- Trayectoria del vehículo: La rueda izquierda se aproxima lo más posible al eje de la calzada, tanto en carreteras convencionales como en dobles calzadas
- La información obtenida se almacena en bloques de 10 metros y se trata posteriormente en gabinete

Los datos de los sensores utilizados se resumen en la tabla 5.5.

Tabla 5.5: *Datos de los sensores utilizados en la toma de datos de pendientes del inventario del MFOM de 2008 (Ministerio de Fomento, 2009a).*

Medida	Sensor	Modelo	Resolución	Paso	Error Máx.	Resolución
Distancia	Óptico	RSO-550	0,8 mm	2 m	0,5 ‰	0,0005
Inclinación	Clinómetro	41152		2 m	±0,1 ‰	0,005°

5.9.2 Procesamiento de los datos

Los datos de pendientes procedentes de los inventarios geométricos se obtuvieron en forma de hojas de cálculo que, entre otras muchas columnas, daban las coordenadas (x_i, y_i) de los puntos y el valor de sus pendientes g_i . En este caso la coordenada z_i proporcionada por los ficheros se comprobó que no coincidía con la altitud obtenida a partir de la integración numérica del dato de las pendientes g_i . Se procedió de la siguiente manera: se dio por buena la z del primer punto de la traza

y se calcularon el resto de coordenadas z_i de los puntos mediante la integración numérica de las pendientes g_i .

El resumen de las trazas utilizadas en los ensayos se puede ver en la tabla 5.6. La descripción de las columnas de la tabla 5.6 es la que se dio en el apartado 5.8.2.

Tabla 5.6: Descripción de los ensayos de reconstrucción realizados a partir de datos tomados con clinómetros

ID	Carretera	Datos	Traza		
			L (m)	Puntos	Sep (m)
1	M-607 Tramo 50 km	Clinómetro	49501,5	4958	10
2	M-607 Tramo 12 km	Clinómetro	13981,1	1401	10
3	N-320 Tramo 8 km	Clinómetro	7860,2	789	10
4	N-403 Tramo 15 km (Toledo)	Clinómetro	12264,3	653	10
3	N-403 Tramo 12 km (Ávila)	Clinómetro	12264,3	653	10

5.9.3 Presentación de resultados y cálculo de errores

El programa de reconstrucción permite dos formas de ejecución: asignando unos valores concretos a los parámetros (pendiente límite y longitud de las rectas de interpolación) y en modo iterativo. En esta segunda forma de ejecución, el programa prueba con diferentes valores para los parámetros, seleccionando la combinación que de lugar al menor error cuadrático medio. Por ejemplo, en la reconstrucción del perfil del tramo de 50 km de la M-607, el proceso iterativo utilizó combinaciones de 18 valores diferentes de la pendiente límite con 30 longitudes de rectas de interpolación, totalizando 540 reconstrucciones diferentes del perfil, entre las que el programa escogió la que arrojaba el menor error cuadrático medio. El tiempo de procesamiento del programa en este caso fue de 84 segundos.

Los resultados proporcionados por el programa de reconstrucción son los siguientes:

- Gráfico de diagramas de pendientes, que compara la muestra de puntos (s_i, g_i) utilizada como entrada de datos y las ecuaciones analíticas del diagrama de pendientes reconstruido
- Gráfico de perfiles longitudinales, que compara la muestra de puntos (s_i, z_i)

del perfil longitudinal original con las ecuaciones analíticas del perfil reconstruido

- Informe de datos y errores, con el resumen de los datos de la traza de cálculo, los parámetros utilizados en la reconstrucción, las rasantes resultantes y los errores cometidos
- Fichero de texto con el listado del estado de rasantes del perfil longitudinal reconstruido

En el caso de los ensayos llevados a cabo con perfiles sintéticos tratados en el apartado 5.7, se conocen las expresiones analíticas del perfil longitudinal original de la carretera y la posición exacta de los puntos frontera entre las distintas rasantes. En el caso de los ensayos en carreteras reales, no se conocen las rasantes del perfil longitudinal original de la carretera, ni sus expresiones analíticas, ni la posición de los puntos frontera entre las diferentes rasantes. Para calcular los errores que se cometen en la reconstrucción, se compararon las cotas de los puntos que se obtienen a partir del perfil longitudinal «*reconstruido*» con las cotas de los puntos en el perfil longitudinal «*original*» de la carretera. El perfil original que se utilizó para la comparación se obtuvo mediante la integración numérica de los datos de las pendientes. Dicha integración numérica de las pendientes la realiza el programa de reconstrucción y se explica en el apartado 5.3.

A partir de esta comparación de cotas se calculan varios errores:

- Media del valor absoluto del error entre las cotas de los puntos
- Máximo del valor absoluto del error entre las cotas de los puntos
- Desviación típica del valor absoluto del error entre las cotas de los puntos
- Error cuadrático medio entre las cotas de los puntos

La tabla 5.7 muestra el resumen de los resultados obtenidos en la reconstrucción de cada uno de los tramos. La explicación detallada de cada ensayo se hace a continuación. Los resultados detallados de los ensayos, incluyendo gráficos, salida completa de resultados, informe de errores y estado de rasantes se incluyen en el anexo C. El análisis de los resultados se detalla en el apartado 5.12.

5.9.4 M-607, tramo completo de 50 km

El objetivo de este ensayo era probar el algoritmo de reconstrucción en un tramo de gran longitud. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.7. Hay que tener en cuenta que el algoritmo utiliza un valor único de la pendiente límite y de la longitud de las rectas de interpolación para todo el tramo reconstruido. En los 50 km hay tramos de autovía y tramos de carretera convencional, atravesando

Tabla 5.7: Resultados de los ensayos de reconstrucción realizados con datos tomados con clinómetros

ID	L(m)	R. Interpol		Rasantes			Errores		
		Pdte.	Kvmax(m)	G	VC	ECM	Desv	Media(m)	Max(m)
1	19,97	$4,50 \times 10^{-5}$	22222	131	228	0,204	0,306	0,332	2,030
2	119,84	$3,00 \times 10^{-5}$	33333	19	44	0,046	0,125	0,175	0,578
3	79,8	$4,00 \times 10^{-5}$	25000	13	48	0,117	0,212	0,269	1,114
4	49,9	$1,00 \times 10^{-7}$	$1,00 \times 10^7$	15	44	0,00004	0,004	0,005	0,028
5	140,4	$3,75 \times 10^{-5}$	26667	20	41	0,321	0,367	0,433	1,865

diferentes tipos de terrenos. Como se verá al analizar el tramo parcial entre Colmenar Viejo y Cerceda, se puede obtener mayor precisión utilizando tramos menores más uniformes.

La figura 5.20 muestra la comparación entre el diagrama de pendientes reconstruido y la muestra de pendientes utilizada en el cálculo. La figura 5.21 muestra el perfil longitudinal reconstruido comparado con el perfil original. En esta figura se puede apreciar que prácticamente no se distingue el perfil reconstruido, que está dibujado encima en rojo, del original, dibujado debajo en azul.

El estado de rasantes del perfil reconstruido se puede consultar en el anexo C. El algoritmo de reconstrucción genera 131 rasantes de pendiente constante y 232 acuerdos parabólicos. No es posible comprobar todo el resultado por no disponer de datos del proyecto completo. La pendiente límite seleccionada por el algoritmo, $4,50 \times 10^{-5}$, da lugar a un parámetro Kv límite de los acuerdos de 22222, que parece un valor razonable para el tipo de terreno ondulado por el que discurre la carretera. El error medio en la medida de las cotas es de 33 cm. La desviación típica respecto de la media son 30 centímetros, lo que indica que la mayoría de los errores estaban entre 33 ± 30 cm. El valor máximo del error, en alguno de los puntos de la traza, es de 2,03 m, que es un valor elevado. Como se ha comentado, sería más conveniente dividir el tramo completo en tramos menores de características más uniformes en cuanto al valor del parámetro Kv de los acuerdos, para obtener resultados más precisos. Este ensayo no pretendía la reconstrucción precisa del tramo, sino probar el rendimiento del algoritmo en el caso de un número muy elevado de puntos y rasantes verticales.

Fig. 5.20: *Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal del tramo de 50 km de la M-607 con datos de clinómetros: diagrama de pendientes*

Fig. 5.21: *Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal del tramo de 50 km de la M-607 con datos de clinómetros: perfil longitudinal*

5.9.5 Carretera M-607, tramo de 12 km entre Colmenar Viejo y Cerceda

Se extrajeron los datos del fichero de pendientes correspondientes al tramo de 12 km de la M-607 entre los hitos kilométricos 36 y 48, correspondiente al recorrido

entre Colmenar Viejo y Cerceda que se ensaya mediante diferentes procedimientos a lo largo de la tesis.

Fig. 5.22: Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo de 12 km de la M-607 con datos de clinómetros: diagrama de pendientes

Los resultados de la reconstrucción son los que muestra la tabla 5.7. La figura 5.22 muestra la comparación de los diagramas de pendientes original y reconstruido. La figura 5.23 muestra la comparación entre los perfiles longitudinales.

La comparación de los resultados de la reconstrucción de este tramo parcial con los resultados mostrados en el apartado anterior correspondientes al tramo total de 50 km, permiten observar que, en este caso, los errores son menores (ver tabla 5.7). El error cuadrático medio en este tramo es de 0,046, frente a al valor de 0,204 obtenido en el tramo completo. El error medio en la medida de la altitud es de 17,5 cm en este caso frente a los 33,2 cm del tramo completo. La desviación típica resultó ser de 12,5 centímetros, con lo que la mayoría de los errores se situaban en valores entre $4,6 \pm 12,5$ cm. En cuanto al error máximo cometido en alguno de los puntos, en el tramo de 12 km es de 57,8 cm, frente a los 2 m del tramo completo.

El número de rasantes de pendiente constante en el perfil reconstruido es 19 y el de acuerdos parabólicos 44. El número total de rasantes, 64, coincide prácticamente con las del proyecto, 65 (ver apartado 5.8). El tipo de las rasantes de la reconstrucción difieren de las del proyecto que eran 32 y 33 respectivamente. Las diferencias pueden estar motivadas por varias causas. Por una parte, el perfil reconstruido tiene una longitud de casi 14 km, frente a los 12 km de los datos de

Fig. 5.23: *Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo de 12 km de la M-607 con datos de clinómetros: perfil longitudinal*

proyecto. Por otra parte, ya se comentó que la carretera actual ha sufrido algunas modificaciones de trazado respecto de los datos de proyecto disponibles. También es posible que la realidad construida no se adaptase exactamente al proyecto. Por último, los errores inherentes a los dispositivos de medida pueden haber afectado al resultado de la reconstrucción.

La pendiente límite utilizada en la reconstrucción tiene un valor de $3,00 \times 10^{-5}$. Esta pendiente límite da lugar a un parámetro vertical límite en el cálculo de 33333. Es mayor que el necesario, según los datos de proyecto, que era 15000 (ver apartado 5.8). Esto también puede hacer que algunas rectas de la realidad construida se interpreten como acuerdos verticales muy tendidos durante el proceso de reconstrucción.

5.9.6 N-320, tramo de Torrelaguna a Venturada (Madrid)

Se trata de un tramo de 8 km de carretera sobre terreno ondulado. Los resultados del ensayo de reconstrucción son los que muestra la tabla 5.7. La figura 5.24 muestra la comparación entre el diagrama de pendientes reconstruido y la muestra de puntos de entrada al algoritmo. La figura 5.25 compara el perfil reconstruido con el perfil original.

Los errores son un poco mayores que los de la reconstrucción de la M-607, con

Fig. 5.24: Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo de 8 km de la N-320 con datos de clinómetros: diagrama de pendientes

un error cuadrático medio de 0,117, un error medio en la medida de la altitud de 26,9 cm, con una desviación típica de 21,2 cm y un error máximo en alguno de los puntos de 1,11 m (ver tabla 5.7).

La pendiente límite de $4,00 \times 10^{-5}$, que da lugar a un parámetro Kv límite de 25000, está en línea con el terreno ondulado al que corresponde la carretera.

5.9.7 N-403, tramo de Toledo a Rielves (Toledo)

En este caso el tramo tiene una longitud de 15 km y discurre sobre terreno llano. La altitud máxima es de 493 m y la mínima de 492,5 m. La pendiente media es prácticamente cero. El resumen de los resultados de la reconstrucción se muestran en la tabla 5.7. El error medio en la medida de la altitud es de 5 mm, con una desviación típica de 4 mm y un error máximo en alguno de los puntos de 2,8 cm. Esto indica que la mayoría de los errores se encontraban entre $5 \pm 4 \text{ mm}$.

La pendiente límite seleccionada por el programa es de $1,00 \times 10^{-7}$ con un parámetro Kv límite de $1,0 \times 10^7$ m. Lógicamente, al tratarse de un terreno llano, el programa busca acuerdos verticales muy tendidos, con variación de la pendiente casi nula.

Contrastan los resultados de este ensayo con los anteriores, tratándose del

Fig. 5.25: Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo de 8 km de la N-320 con datos de clinómetros: perfil longitudinal

Fig. 5.26: Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo llano de 15 km de la N-403 con datos de clinómetros: diagrama de pendientes

ensayo que mayor precisión alcanza.

La figura 5.26 muestra la comparación entre el diagrama de pendientes

reconstruido y la muestra de pendientes que se han utilizado en el cálculo. Aunque el gráfico parezca abrupto, es por estar deformada la escala para cubrir todo el espacio disponible. Se puede observar en el eje de las pendientes los pequeños valores que toma esta. La figura 5.27 muestra el perfil longitudinal reconstruido dibujado sobre el perfil longitudinal original, que es indistinguible.

Fig. 5.27: Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo llano de 15 km de la N-403 con datos de clinómetros: perfil longitudinal

5.9.8 N-403, tramo de Casas del Burguillo a El Barraco

Este ensayo corresponde a un tramo de 12 km de la carretera N-403 que discurre por terreno montañoso entre Casas del Burguillo y El Barraco, en la provincia de Ávila. La altitud mínima del tramo es de 712 m y la máxima de 945 m. La pendiente media es del 1,5 %.

El resumen de los resultados es el de la tabla 5.7. La figura 5.28 muestra el diagrama de pendiente reconstruido sobre la muestra de pendientes utilizada en el cálculo. La figura 5.29 muestra la comparación entre el perfil longitudinal reconstruido y el perfil original.

Se puede observar que es el ensayo que menos precisión obtiene en la reconstrucción, con un error medio de 43 cm. Sin duda, el hecho de tratarse de terreno montañoso afecta a la precisión del algoritmo, pero la observación de la figura 5.28 parece indicar también que los aparatos de medida arrojaron mayores

Fig. 5.28: Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo montañoso de 12 km de la N-403 con datos de clinómetros: diagrama de pendientes

Fig. 5.29: Reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de un tramo montañoso de 12 km de la N-403 con datos de clinómetros: perfil longitudinal

errores en este caso. En el apartado 5.11.2 se analizará este mismo tramo descomponiéndolo en tres tramos menores de características más uniformes y se obtendrán precisiones mayores.

La pendiente límite seleccionada por el programa está en línea con las pendientes límite seleccionadas en los terrenos ondulados.

5.10 ENSAYOS CON DATOS DE RECEPTORES GNSS

Aunque inicialmente el algoritmo está pensado para trabajar con datos de pendientes procedentes de clinómetros, también se pueden utilizar datos procedentes de receptores GNSS, tal como se explica en el apartado 5.2. Para comprobarlo, se realizaron ensayos con datos procedentes de receptores GNSS tomados recorriendo diferentes carreteras. Se eligieron tramos de carreteras con diferentes características del perfil longitudinal: terreno ondulado y terreno montañoso. Se utilizaron datos procedentes de diferentes receptores GNSS: receptores profesionales de alta gama, un receptor Garmin de bajo coste y el GPS de un teléfono móvil grabando con el programa RoadRecorder. La tabla 5.8 muestra los tramos de carretera ensayados.

Tabla 5.8: *Tramos de carretera ensayados con datos procedentes de receptores GNSS.*

Carr.	Prov.	Inicio		Fin		L (km)	Terreno
		PK	Localidad	PK	Localidad		
M-607	Madrid	36	Colmenar Viejo	48	Cerceda	12	Ondulado
M-633	Madrid	0	Cabanillas	6	Valdemanco	6,5	Montañoso
M-513	Madrid	8	Boadilla del Monte	17	Brunete	9	Ondulado
M-325	Madrid	-	C. de Oreja	-	Villamanrique	4	Ondulado

5.10.1 Toma de datos

En los casos de datos procedentes de receptores GNSS, se recorrieron las carreteras en los dos sentidos de circulación, a velocidades entre 50 y 90 km/h , según los casos, de forma que no se crearan molestias en el tráfico existente. Se procuró que el vehículo siguiera una trayectoria paralela a la línea del eje de la carretera. Las velocidades de recorrido utilizadas, junto con la frecuencia de los receptores GPS utilizados dieron lugar a trazas con puntos separados por diferentes distancias. Por ejemplo, en el caso de los GPS de los teléfonos móviles, que tienen una frecuencia de actualización de aproximadamente 1 s, recorriendo la

vía a 80 km/h , se obtienen puntos cada 22 m . En el caso de los GPS profesionales con frecuencias de $0,1 \text{ s}$, recorriendo la carretera a la misma velocidad de 80 km/h , se obtienen puntos cada dos metros de distancia.

Los dispositivos GNSS utilizados fueron los siguientes:

- GPS Topcon GR-3 multifrecuencia, $0,1 \text{ s}$
- GPS Leica System 500. multifrecuencia, 1 s . Terminal TR 500, Receptor SR 510 y antena AT501
- GPS Garmin modelo GPSMap 64S, frecuencia 1 s
- GPS Samsung SIII grabando con el programa *RoadRecorder*, frecuencia 1 s

En el caso de la carretera M-607, uno de los recorridos se grabó utilizando un GPS *Topcon* con corrección diferencial, sistema RTK (*Real Time Kinematic*), mediante el apoyo de una estación fija en tierra situada en el vértice geodésico cercano de «La Ollera». En la figura 5.30a se puede ver, en primer plano, el detalle de la fijación de la antena GPS al techo del vehículo y, al fondo de la fotografía, el vértice geodésico de «La Ollera». En la figura 5.30b se puede apreciar un detalle de la instalación del receptor fijo sobre el vértice geodésico.

Fig. 5.30: a) Detalle de la fijación de la antena GPS al techo del automóvil. b) Detalle de la fijación del receptor GPS en el vértice geodésico de La Ollera

En los casos en los que se utilizó el programa *RoadRecorder*, se fijó el teléfono en el espejo retrovisor del vehículo según se ha explicado en el apartado 3.5.1 y se puede ver en la figura 3.5.

En la descripción de cada ensayo concreto se indicará qué receptor GNSS se

utilizó.

5.10.2 Procesamiento de los datos

El programa de reconstrucción solicita como entrada de datos la traza de pendientes (s_i, g_i) . Cuando los datos proceden de receptores GNSS es más habitual disponer de las trazas (x_i, y_i, z_i) de los puntos. El programa permite dicha entrada de datos y utiliza una función implementada al efecto para calcular las pendientes (s_i, g_i) siguiendo el procedimiento que se explica en el apartado 5.2, mediante aplicación de las expresiones 5.7 y 5.8.

El receptor *Garmin* proporciona las trazas de los recorridos en formato GPX, y en coordenadas geográficas, (*longitud, latitud*), del sistema de referencia WGS84. Se utilizó el programa QGIS para convertir los ficheros GPX al formato *shapefile*, reproyectar las trazas al sistema de referencia ETRS89 y generar los ficheros CSV con las trazas en coordenadas (x_i, y_i, z_i) que requiere el programa de reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal.

Algunos de los receptores GNSS entregaban los datos en ficheros CSV, en coordenadas geográficas del sistema de referencia ED50. De manera similar al caso anterior, se utilizó el programa QGIS para convertir a formato *shapefile* y reproyectar al sistema de referencia ETRS89. En este caso, por tener que hacer un cambio de *Datum*, se utilizó la «*Rejilla para cambio de Datum entre ED50 y ETRS89, en formato NTV2*», al objeto de obtener la máxima precisión en la transformación de coordenadas (*Centro Nacional de Información Geográfica, 2007; Ministerio de la Presidencia de España and Ministerio de Fomento, 2007*). Finalmente, se generaron los ficheros CSV con las coordenadas (x_i, y_i, z_i) de los puntos.

En el caso de las trazas de recorridos grabadas con el programa *RoadRecorder*, el propio programa entrega los datos en formatos GPX y CSV, y con las coordenadas de los puntos en la proyección UTM del sistema de referencia ETRS89.

Cuando se disponía de varias trazas de un mismo tramo de carretera procedentes de diferentes recorridos, se procedió a recortarlas en los extremos, de forma que todas comenzaran y acabaran aproximadamente en la misma sección de la carretera y se pudieran hacer comparaciones y cálculos de trazas medias. Estos recortes de trazas se realizaron con el programa QGIS, pasando previamente las trazas al formato *shapefile* y reproyectándolas todas en el mismo sistema de referencia.

Cuando se recorre la carretera en los dos sentidos de circulación, las trazas

resultantes quedan invertidas, esto es, los primeros puntos de una de ellas se corresponden con los últimos puntos de la otra traza. En algunos casos se utilizaban estas parejas de trazas para calcular la traza media y aproximar la posición del eje de la carretera. El programa de reconstrucción tiene una utilidad que permite invertir el sentido de una traza. Así se hizo, de forma que las trazas de los recorridos quedaran en el sentido ascendente del kilometraje.

Para calcular el eje de la carretera a partir de una pareja de trazas correspondientes a dos recorridos de la misma, uno en cada sentido de circulación, el programa de reconstrucción dispone de una utilidad que permite realizar dicho cálculo de la «traza media» de otras dos, previa inversión del sentido de una de ellas.

5.10.3 Presentación de resultados y cálculo de errores

El cálculo de errores y la presentación de resultados del programa de reconstrucción para el caso de datos procedentes de receptores GNSS es idéntico al caso de datos procedentes de clinómetros explicado en el apartado 5.9.3.

5.10.4 Carretera M-607 (GPS Topcon)

Se recorrió la carretera M-607 en el sentido creciente del kilometraje grabando la traza con un receptor GNSS marca Topcon modelo GR-3 multifrecuencia. Se utilizó corrección diferencial vía radio, en tiempo real, mediante la técnica de *Real Time Kinematic* (RTK). Para poder realizar la corrección diferencial se dispuso una estación fija en tierra, en el vértice geodésico de La Ollera (ver figura 5.30).

La velocidad de recorrido fue de 80 km/h, que con la frecuencia efectiva del receptor de 0.1 s, dio lugar a puntos cada 2 m. Para fijar la posición de los puntos, el receptor utilizaba una combinación de satélites del sistema GPS y del sistema Glonass.

Durante el recorrido hubo zonas en las que se perdió la señal, por lo que se decidió utilizar tres tramos independientes de la M-607 para el ensayo de reconstrucción. Los tramos ensayados se describen en la tabla 5.9.

En la figura 5.31 se hace una comparación entre el diagrama de pendientes reconstruido y la muestra de pendientes que se utilizó para el cálculo en el ensayo número 1, el de mayor longitud. En la figura 5.32 se comparan el perfil longitudinal reconstruido con el original, también en el ensayo 1. Como se puede apreciar en la figura, el perfil original es indistinguible del reconstruido.

Tabla 5.9: Descripción de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Topcon GR-3 con corrección diferencial

ID	Carretera	Datos	Traza		
			L (m)	Puntos	Sep (m)
1	M-607 S=14630 a S=18075	GPS Topcon GR-3	3713,79	1704	2,18
2	M-607 S=18206 a S=19277	GPS Topcon GR-3	1039,87	468	2,23
3	M-607 S=22241 a S=25325	GPS Topcon GR-3	3084,92	1409	2,19

Tabla 5.10: Resultados de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Topcon GR-3 con corrección diferencial

ID	L(m)	R. Interpol		Rasantes			Errores		
		Pdte	Kvmax(m)	G	VC	ECM	Desv(m)	Media(m)	Max(m)
1	39,25	$1,75 \times 10^{-5}$	57143	7	20	0,0077	0,056	0,067	0,325
2	26,72	$1,25 \times 10^{-5}$	80000	2	6	0,0031	0,036	0,042	0,222
3	42,82	$1,00 \times 10^{-4}$	10000	11	10	0,0091	0,059	0,075	0,245

El ensayo con mejores resultados es el número 2. El error medio en la medida de la altitud no supera en ninguno de los tres casos los 8 centímetros, con desviación típica inferior a los 6 cm y con errores máximos por debajo de los 33 cm.

Las pendientes límite seleccionadas por el algoritmo dan lugar a valores del parámetro Kv límite un poco altos en relación con los del proyecto. El ensayo 2, el de mayor precisión, utiliza un Kv límite de 80000. Hay que tener en cuenta que, aunque el tramo total es ondulado, los tramos parciales pueden ser más llanos, con lo que necesita acuerdos verticales más tendidos. También puede suceder que la realidad de la puesta en obra de algunos tramos de pendiente constante se haya traducido, en la práctica, en acuerdos verticales muy tendidos. El número de rasantes obtenidas por el algoritmo está en línea con los que corresponderían a los tramos según el proyecto.

Fig. 5.31: Resultados de los ensayos de reconstrucción de la carretera M-607 con un GPS Topcon GR-3 con corrección diferencial: diagrama de pendientes

Fig. 5.32: Resultados de los ensayos de reconstrucción de la carretera M-607 con un GPS Topcon GR-3 con corrección diferencial: perfil longitudinal

5.10.5 Carretera M-607 (GPS Leica)

Para la obtención de los puntos de la carretera se utilizó un equipo *Leica Geosystem 500*, compuesto por un terminal TR500, un receptor SR 510 y una antena de tipo

micostrip AT 501. El equipo se instaló en un vehículo con el terminal y el receptor dentro del mismo, conectados con un cable coaxial a la antena que se situó en el exterior, localizada en el centro del techo. Se recorrió la carretera en los dos sentidos a una velocidad media de 80 km/h.

En la tabla 5.11 se muestra el resumen de las tres trazas ensayadas. Las dos primeras corresponden a los recorridos efectuados, mientras que la tercera es el eje obtenido calculando los puntos medios de las dos trazas anteriores. La tabla 5.12 resume los resultados obtenidos en los tres ensayos. Las columnas que aparecen en las tablas son las que se han descrito en el apartado 5.8.

Tabla 5.11: Descripción de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Leica Geosystem 500

ID	Carretera	Datos	Traza		
			L (m)	Puntos	Sep (m)
1	M-607 Ascendente	GPS Leica Geosystem 500	12224,74	607	20,17
2	M-607 Descendente	GPS Leica Geosystem 500	12238,93	661	18,54
3	M-607 Eje promediado	GPS Leica Geosystem 500	12204,65	606	20,17

Tabla 5.12: Resultados de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Leica Geosystem 500

ID	R. Interpol			Rasantes			Errores		
	L(m)	Pdte	Kvmax(m)	G	VC	ECM	Desv(m)	Media(m)	Max(m)
1	80,69	$6,50 \times 10^{-5}$	15385	21	45	0,394	0,450	0,440	2,447
2	92,72	$3,50 \times 10^{-5}$	28571	20	52	0,181	0,280	0,321	1,245
3	121,04	$5,00 \times 10^{-5}$	20000	17	17	0,350	0,420	0,418	2,300

El ensayo más preciso fue el número 2, el del recorrido en sentido descendente del kilometraje. El error medio en este caso fue de 32 cm, con una desviación típica de 28 cm. En este caso, el eje promediado no mejoró la precisión obtenida por el ensayo número 2. Las pendientes límite seleccionadas por el algoritmo para la reconstrucción dan lugar a unos valores de Kv límite adecuados para el terreno ondulado por el que discurre el recorrido. La longitud de las rectas de interpolación,

en el ensayo número 2, fue de 92.72 metros. Esto equivale, con la separación media entre puntos de 18.54 metros, a tomar rectas de interpolación formadas por cinco puntos: el punto bajo análisis y los cuatro puntos anteriores o posteriores.

Fig. 5.33: Resultados de los ensayos de reconstrucción de la carretera M-607 con un GPS Leica Geosystem 500. Diagrama de pendientes

El número de rasantes del perfil reconstruido en el ensayo 2 fue de 20 rasantes de pendiente constante y 52 acuerdos parabólicos. Es un número total de rasantes algo mayor que el del proyecto, que eran 65. También hay más acuerdos parabólicos que en proyecto y menos rasantes de pendiente constante, como ya se ha observado en otros ensayos. El algoritmo tiende a utilizar acuerdos parabólicos tendidos en algunos lugares en los que el proyecto disponía pendientes constantes. Esto puede estar motivado por la forma de trabajar del algoritmo con los errores inherentes a los dispositivos de medida, pero también podría suceder, como ya se ha comentado, que la ejecución en obra de las rasantes de pendiente constante no fuera tan precisa como indicaban los planos, tendiendo más a hacer acuerdos parabólicos tendidos que verdaderas rampas o pendientes. Para comprobar este extremo habría que hacer el levantamiento preciso sobre el terreno de algunas de estas rasantes y comprobar su verdadera forma.

La figura 5.33 compara el diagrama de pendientes reconstruido con la muestra de pendientes utilizada en el cálculo del ensayo número 2. La figura 5.34 comparan los perfiles longitudinales original y reconstruido para el mismo ensayo. A la escala del dibujo, el perfil original, dibujado debajo en azul, es prácticamente indistinguible del perfil reconstruido.

Fig. 5.34: Resultados de los ensayos de reconstrucción de la carretera M-607 con un GPS Leica Geosystem 500: perfil longitudinal

5.10.6 Carretera M-607 (GPS Garmin)

Se hicieron dos recorridos, uno en cada sentido de circulación. El receptor utilizado para grabar la traza fue un Garmin modelo *GPSMap 64s*. El coste del receptor es de unos doscientos euros, por lo que se considera de bajo coste.

Se aplicó el algoritmo de reconstrucción en modo iterativo a las dos trazas, dejando que el programa seleccionara los valores de la pendiente límite y la longitud de las rectas de interpolación que daban lugar a un menor error cuadrático medio. Además, se calculó la traza correspondiente a los puntos medios de las dos trazas anteriores. A esta traza también se aplicó el algoritmo de reconstrucción.

En la tabla 5.13 se muestra el resumen de las tres trazas ensayadas. La tabla 5.14 resume los resultados obtenidos en los tres ensayos. Las columnas que aparecen en las tablas son las que se han descrito en el apartado 5.8.

De la observación de los resultados se puede ver, en primer lugar, que el ensayo que mejores resultados arroja es el ensayo 2, el recorrido en sentido descendente. El error cuadrático medio obtenido es de 1,219, con una desviación típica de 0,663 m y un error medio en valor absoluto de 0,884 m. El número de rasantes resultantes son 6 rasantes de pendiente constante y 16 acuerdos parabólicos, un número muy inferior a la realidad del proyecto en ese tramo que tiene 32 rasantes de pendiente constante y 33 acuerdos parabólicos.

Tabla 5.13: Descripción de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Garmin GPSMap 64S

ID	Carretera	Datos	Traza		
			L (m)	Puntos	Sep (m)
1	M-607 Ascendente	GPS Garmin GPSMap 64S	12285,5	654	18,84
2	M-607 Descendente	GPS Garmin GPSMap 64S	12485,7	496	25,22
3	M-607 Eje promediado	GPS Garmin GPSMap 64S	12264,3	653	18,81

Tabla 5.14: Resultados de los ensayos de reconstrucción realizados en la carretera M-607 grabando las trazas con un GPS Garmin GPSMap 64S

ID	R. Interpol			Rasantes			Errores		
	L(m)	Pdte	Kvmax(m)	G	VC	ECM	Desv(m)	Media(m)	Max(m)
1	244,6	$1,50 \times 10^{-5}$	66667	5	8	5,950	1,395	2,003	7,899
2	327,9	$1,50 \times 10^{-5}$	66667	6	16	1,219	0,663	0,884	3,582
3	150,5	$1,75 \times 10^{-5}$	57143	7	16	5,159	1,659	1,556	8,491

En cuanto a los parámetros de reconstrucción, en el mismo ensayo 2, se obtiene una pendiente límite de $1,50 \times 10^{-5}$, lo que indica que los acuerdos que es capaz de identificar son aquellos cuyo parámetro sea menor de 66667, en valor absoluto. La longitud de las rectas de interpolación utilizadas en la reconstrucción fue de 327,9 m.

En la tabla 5.13 se puede observar también que el ensayo 2, el que arroja los mejores resultados, corresponde a una velocidad mayor de recorrido. La separación entre puntos de 25 m con frecuencia de 1 s en el receptor, corresponde a una velocidad media de 90 km/h, mientras que el ensayo 1 corresponde a una velocidad de recorrido de unos 68 km/h. Esto puede ser debido a la diferente precisión del GPS en diferentes momentos, motivada por la situación de los satélites u otras causas ajenas al ensayo en sí.

Otra observación acerca de los resultados es que el cálculo del eje promediado no mejora los resultados de la reconstrucción. Los errores que se obtienen están comprendidos entre los de las trazas que se utilizaron para calcular el eje promediado.

En la figura 5.35 se puede ver la salida del diagrama de pendientes calculado

Fig. 5.35: Resultados de los ensayos de reconstrucción de la M-607 con un GPS Garmin GPSMap 64S. Diagrama dependientes, ensayo número 2

por el programa comparada con la muestra de pendientes que sirvieron de base al cálculo, en el caso del ensayo 2. Se puede observar la poca uniformidad de los datos de pendientes, lo que indica poca precisión en los datos de altitud proporcionados por el receptor. Por su parte, la figura 5.36 muestra la comparación entre el perfil longitudinal reconstruido y el original, para ese mismo ensayo. En este caso se puede ver que, aunque el ajuste en general no es malo, hay tramos en los que el algoritmo no es capaz de identificar correctamente las rasantes, sustituyéndolas por una sola alineación de pendiente constante. Esto sucede, por ejemplo, entre $d=4000$ y $d=6000$.

5.10.7 Carretera M-607 (teléfono móvil con RoadRecorder)

Se recorrió la carretera en los dos sentidos a una velocidad media entre 90 km/h en el sentido ascendente y 80 km/h en el descendente. Además, se calculó el eje promediando las dos trazas. La tabla 5.15 resume los datos de las tres trazas ensayadas.

El programa se ejecutó en modo iterativo. El programa realizó 204 reconstrucciones combinando 17 valores de la pendiente límite comprendidos entre $1,00 \times 10^{-4}$ y $1,00 \times 10^{-7}$, y 12 longitudes de las rectas de interpolación, entre 48,4 m y 314,5 m. El tiempo de cómputo que utilizó el programa para encontrar la reconstrucción más precisa y mostrar la salida de resultados fueron 3

Fig. 5.36: Resultados de los ensayos de reconstrucción de la carretera M-607 con un GPS Garmin GPSMap 64S. Perfil longitudinal, ensayo número 2

s. La tabla 5.16 muestra los resultados de la reconstrucción en los tres ensayos, los valores seleccionados para los parámetros y los errores incurridos.

En la figura 5.37 se muestran las rasantes del diagrama de pendientes reconstruido sobre la muestra de pendientes que se utilizó en el cálculo del ensayo número 3. Se puede observar las fluctuaciones en los valores de las pendientes, que indican poca precisión en la medida de la altitud proporcionada por el receptor GNSS. La figura 5.38 muestra el perfil reconstruido dibujado sobre el perfil original para ese mismo ensayo. Se aprecian algunas zonas en las que el algoritmo no es capaz de discernir los acuerdos parabólicos que se intuyen en el perfil original, sustituyéndolos por rasantes de pendiente constante o acuerdos parabólicos más tendidos. Esto sucede en el tramo entre $s=300$ y $s=4500$ y en el tramo entre $s=8500$ y $s=10000$.

El ensayo más preciso de los tres resultó ser el del eje promediado de las dos trazas. Este ensayo redujo el error cuadrático medio en un 16 %, y el error medio en un 15 %.

Las pendientes límite seleccionadas por el algoritmo están en línea con los valores que era de esperar para el terreno ondulado por el que discurre la M-607, resultando parámetros K_v límites entre 16667 y 30769, siendo este último el que mejores resultados de reconstrucción obtuvo.

Las longitudes de las rectas de interpolación utilizadas en la reconstrucción

Tabla 5.15: Descripción de los ensayos de reconstrucción en la M-607 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII

ID	Carretera	Datos	Traza		
			L (m)	Puntos	Sep (m)
1	M-607 Ascendente	RoadRecorder	12019,7	498	24,18
2	M-607 Descendente	RoadRecorder	12023,3	558	21,59
3	M-607 Eje promediado	RoadRecorder	11997,2	497	24,19

Tabla 5.16: Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-607 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII

ID	R. Interpol			Rasantes			Errores		
	L(m)	Pdte	Kvmax(m)	G	VC	ECM	Desv(m)	Media(m)	Max(m)
1	48,37	$6,00 \times 10^{-5}$	16667	13	26	3,613	1,383	1,310	8,318
2	43,17	$8,00 \times 10^{-5}$	12500	14	33	1,716	0,874	0,977	6,071
3	145,13	$3,25 \times 10^{-5}$	30769	13	28	1,437	0,869	0,829	5,015

resultaron de alrededor de 45 m para las trazas originales, y 145 m en la reconstrucción del eje promediado, el de mejores resultados.

En cuanto al número de rasantes del perfil reconstruido, en el caso del ensayo 3, fueron 13 rasantes de pendiente constante y 28 acuerdos parabólicos. El total de rasantes, 41, es algo menor que las 65 rasantes del proyecto en ese tramo.

5.10.8 Carretera M-633 (teléfono móvil con RoadRecorder)

La M-633 es una carretera de calzada única y doble sentido de circulación sin arcenes, en la Comunidad de Madrid, que une las localidades de Cabanillas de la Sierra y Valdemanco. El tramo tiene una longitud de 6.25 kilómetros. La cota en el inicio del tramo es de 976.3 m y en el final del tramo 1007.9, lo que arroja una pendiente media del 2.7 %. La tipología del terreno correspondería a terreno entre ondulado y montañoso.

Se recorrió la carretera en los dos sentidos, grabando la traza con un teléfono

Fig. 5.37: Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-607 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Diagrama de pendientes

Fig. 5.38: Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-607 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Perfil longitudinal

móvil *Samsung Galaxy SIII* y el programa *RoadRecorder*. Se realizaron dos recorridos en cada sentido. La velocidad media de los recorridos fue de 45 km/h.

En la tabla 5.17 se pueden ver los datos de las trazas registradas. Son trazas de unos quinientos puntos espaciados en torno a 12 m. Esta separación de puntos se

Fig. 5.39: Carretera M-633, de Cabanillas de la Sierra a Valdemanco (Madrid). Plano de situación

Tabla 5.17: Descripción de los ensayos de reconstrucción en la M-633 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII

ID	Carretera	Datos	Traza		
			L (m)	Puntos	Sep (m)
1	M-633 Ascendente Tramo completo	RoadRecorder	6253,4	538	11,65
2	M-633 Descendente Tramo completo	RoadRecorder	5908,6	487	12,16
3	M-633 Ascendente Tramo completo	RoadRecorder	6143,5	521	11,81
4	M-633 Descendente Tramo completo	RoadRecorder	5502,3	455	12,12

corresponde con una velocidad de recorrido de 78 km/h.

En la tabla 5.18 se muestra el resumen de los resultados de la reconstrucción. Los errores medios fueron inferiores a 1 m, en todos los ensayos, con desviaciones típicas también inferiores al metro. En concreto, el ensayo con mejores resultados fue el ensayo 4, que corresponde al segundo recorrido en sentido descendente. El

Tabla 5.18: Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-633 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII

ID	R. Interpol			Rasantes			Errores		
	L(m)	Pdte	Kvmax(m)	G	VC	ECM	Desv(m)	Media(m)	Max(m)
1	69,9	$7,00 \times 10^{-5}$	14286	10	28	0,578	0,464	0,604	2,183
2	231,0	$3,50 \times 10^{-5}$	28571	7	21	1,608	0,943	0,850	5,386
3	200,8	$3,50 \times 10^{-5}$	28571	5	14	1,036	0,689	0,753	3,331
4	72,7	$9,00 \times 10^{-5}$	11111	10	28	0,902	0,644	0,699	2,848

error medio en la determinación de la altitud de los puntos a partir de las expresiones analíticas de las rasantes reconstruidas, en su comparación con la altitud de los puntos del perfil original fue de 70 cm. La desviación típica en este ensayo fueron 64 cm. Los errores máximos en alguno de los puntos del recorrido, son altos en todos los ensayos, entre 2 y 5 m.

Fig. 5.40: Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-633 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Diagrama de pendientes

La figura 5.40 muestra el diagrama de pendientes reconstruido comparado con la muestra de pendientes que se utilizó para el cálculo, en el ensayo número 1. Se aprecia la variabilidad de las pendientes leídas en un mismo tramo, señal de la poca precisión de las medidas del dispositivo. La figura 5.41 muestra la comparación entre

Fig. 5.41: Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-633 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Perfil longitudinal

los perfiles longitudinales original y reconstruido, también para el ensayo número 1.

5.10.9 Carretera M-513 (teléfono móvil con RoadRecorder)

Se han realizado varios ensayos de reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de la carretera M-513. Se trata del tramo de 9 km entre las localidades de Boadilla del Monte y Brunete, en la provincia de Madrid. La carretera tiene una sola calzada y dos carriles de circulación, uno en cada sentido de recorrido. La carretera discurre por terreno ondulado.

Se realizaron dos recorridos en cada sentido grabando las trazas con un teléfono móvil marca Samsung SIII fijado al retrovisor del vehículo según el procedimiento descrito en otros apartados de esta tesis. La velocidad de recorrido fue de 80 km/h. Las trazas resultantes estaban formadas por puntos separados en torno a 20 m.

Se han realizado un total de siete ensayos a partir de las cuatro trazas recogidas. La tabla 5.19 muestra el resumen de los datos utilizados en cada ensayo. Las cuatro primeras líneas de la tabla, corresponden a las trazas de los dos recorridos que se hicieron en cada sentido. La línea 5 corresponde al eje calculado como promedio de los puntos de las trazas 1 y 2. La línea 6 corresponde al eje calculado como promedio de las trazas 3 y 4. La línea 7 corresponde al eje calculado como promedio de los ejes 5 y 6.

Tabla 5.19: Descripción de los ensayos de reconstrucción en la M-513 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII

ID	Carretera	Datos	Traza		
			L (m)	Puntos	Sep (m)
1	M-513 Ascendente	RoadRecorder	8885,46	421	21,16
2	M-513 Descendente	RoadRecorder	8884,93	471	18,90
3	M-513 Ascendente	RoadRecorder	9062,91	493	18,42
4	M-513 Descendente	RoadRecorder	9023,38	499	18,12
5	M-513 Eje promediado de 1 y 2	RoadRecorder	8856,67	420	21,14
6	M-513 Eje promediado de 3 y 4	RoadRecorder	9021,42	492	18,37
7	M-513 Eje promediado de 5 y 6	RoadRecorder	8848,08	419	21,17

En cada uno de los siete ensayos se ejecutó el algoritmo en el modo iterativo, de forma que fuera el propio algoritmo el que seleccionara los valores más adecuados para la pendiente límite y la longitud de las rectas de interpolación. El resumen de los resultados obtenidos se puede ver en la tabla 5.20.

Se puede ver en la tabla 5.20, que los ejes promediados 5 y 6 mejoran la precisión de las trazas individuales utilizadas para obtenerlos. También se puede ver, en la misma tabla, que el ensayo 7, el eje promediado de las cuatro trazas, mejora la precisión de todos los ensayos anteriores. En este último caso, el error medio en la determinación de la altitud de los puntos fue de 92 cm, con una mejora de precisión respecto de la traza 3, la mejor traza individual, del 23 %. La desviación típica del ensayo 7, promedio de las cuatro trazas, fue de 73 centímetros. Ello supone una reducción de la desviación típica respecto del ensayo 3 del 18 %.

En la figura 5.42 se compara el diagrama de pendientes del perfil reconstruido con la muestra de pendientes que se utilizó como entrada de datos al algoritmo de reconstrucción en el caso del ensayo número 7. Una vez más, se aprecia la variabilidad en las medidas para un mismo tramo que proporciona el receptor GNSS del teléfono.

En la figura 5.43 se ha dibujado, también para el ensayo 7, el perfil longitudinal reconstruido sobre el perfil original, para que se puedan apreciar las diferencias. Los valores de pendiente límite seleccionados por el algoritmo dan lugar a parámetros Kv comprendidos entre 10000 y 50000. En el ensayo 7 el parámetro Kv

Tabla 5.20: Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-513 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII

ID	R. Interpol			Rasantes			Errores		
	L(m)	Pdte	Kvmax(m)	G	VC	ECM	Desv(m)	Media(m)	Max(m)
1	211,56	$2,50 \times 10^{-5}$	40000	3	19	2,616	1,030	1,249	2,027
2	189,04	$3,00 \times 10^{-5}$	33333	5	13	4,481	1,316	1,661	8,048
3	239,47	$3,00 \times 10^{-5}$	33333	8	21	2,224	0,890	1,199	4,308
4	90,60	$1,00 \times 10^{-4}$	10000	7	22	6,771	2,888	1,977	9,078
5	253,65	$3,00 \times 10^{-5}$	33333	7	20	1,849	0,917	1,006	4,684
6	165,36	$2,00 \times 10^{-5}$	50000	4	15	1,894	0,864	1,075	4,310
7	190,51	$2,00 \times 10^{-5}$	50000	5	16	1,377	0,730	0,922	3,061

Fig. 5.42: Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-513 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Diagrama de pendientes

fue 50000. Un valor un poco alto para el tipo de terreno ondulado por el que discurre la carretera. La interpretación podría ser la que ya se ha comentado en otros ensayos anteriores.

Fig. 5.43: Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-513 grabando con RoadRecorder en un Samsung Galaxy SIII. Perfil longitudinal

5.10.10 Carretera M-325 (GPS Topcon)

La M-325 es una carretera de calzada única y dos carriles de circulación, uno en cada sentido, situada entre las localidades de Colmenar de Oreja y Villamanrique de Tajo, en la provincia de Madrid. Se recorrió la carretera en el sentido ascendente grabando la traza con un receptor GNSS Topcon GR-3.

La combinación de la frecuencia del dispositivo, 0.1 s, con la velocidad de recorrido, dio lugar a una traza con puntos espaciados 91 cm. La carretera discurre por una zona angosta y rodeada de abundante vegetación. Algunas zonas de la traza presentaban datos incorrectos de altitud, por lo que se seleccionó un tramo de 3725 metros para el ensayo de reconstrucción.

La tabla 5.21 muestra el resumen de los datos de la traza ensayada. En la tabla 5.22 se pueden ver el resumen de los resultados obtenidos en la reconstrucción del tramo ensayado. En la figura 5.44 se muestra la comparación entre el diagrama de pendientes reconstruido y la muestra de puntos utilizada para el cálculo. Por su parte, la figura 5.45, muestra la comparación entre el perfil longitudinal reconstruido y el original.

Los resultados del ensayo están en línea con los obtenidos en los ensayos del apartado 5.10.4, que también se hizo con el receptor Topcon de última generación. El error medio en la determinación de las altitudes de los puntos del perfil

Tabla 5.21: Descripción del ensayo de reconstrucción de la M-325, traza grabada con un receptor GNSS Topcon con corrección diferencial

ID	Carretera	Datos	Traza		
			L (m)	Puntos	Sep (m)
1	M-325 Ascendente	GPS Topcon + RTK	3725.56	4102	0,91

Tabla 5.22: Resultados del ensayo de reconstrucción de la M-325, traza grabada con un receptor GNSS Topcon con corrección diferencial

ID	R. Interpol			Rasantes			Errores		
	L(m)	Pdte	Kvmax(m)	G	VC	ECM	Desv(m)	Media(m)	Max(m)
1	22.73	$1,50 \times 10^{-4}$	10000	21	20	0,0097	0,068	0,071	0,326

reconstruido respecto de los puntos del perfil original fue de 7,1 cm, con una desviación típica de 6,8 cm y un error máximo en algún punto del perfil de 32,6 cm. La pendiente límite seleccionada por el algoritmo de reconstrucción da lugar a un parámetro límite para los acuerdos parabólicos de 10000, acorde para este tipo de carretera.

Fig. 5.44: Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-325 a partir de una traza obtenida con un receptor GNSS Topcon con corrección diferencial. Diagrama de pendientes

Fig. 5.45: Resultados de los ensayos de reconstrucción en la M-325 a partir de una traza obtenida con un receptor GNSS Topcon con corrección diferencial. Perfil longitudinal

5.11 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.11.1 Resultados en función del tipo de dispositivo

El algoritmo de reconstrucción está pensado, inicialmente, para utilizar datos de pendientes tomados en las carreteras mediante clinómetros. No obstante, la

utilización de receptores GNSS de calidad puede proporcionar también datos con los que es posible realizar la reconstrucción. De hecho, los menores errores se han obtenido en los tramos ensayados a partir de datos obtenidos con receptores GNSS con corrección diferencial.

Tabla 5.23: *Resultados medios de los errores obtenidos en los ensayos de reconstrucción con datos de diferentes tipos de dispositivos*

Tipo de dispositivo	ECM	Desv. Típica(m)	Error medio(m)	Error máx.(m)
Clinómetros	0,1376	0,2028	0,2428	1,123
GNSS Topcon GR3	0,0074	0,0548	0,0638	0,280
GNSS Leica System 500S	0,3083	0,3833	0,3930	1,997
GNSS Garmin GpsMap 64S	3,5845	1,0290	1,4435	5,741
Teléfono móvil Samsung SIII	2,5545	1,1121	1,1279	5,160

La tabla 5.23 muestra las medias obtenidas en los ensayos realizados a partir de diferentes tipos de dispositivos. Cada fila de la tabla 5.23 corresponde a un tipo de dispositivo. En las columnas aparecen el error cuadrático medio en la medida de las altitudes de los puntos, la desviación típica, el error medio y el error máximo. Los valores son las medias de los obtenidos en los distintos ensayos hechos con cada tipo de dispositivo.

Los ensayos que han dado lugar a los menores errores han sido los realizados con datos procedentes del receptor GNSS Topcon GR 3. Para obtener los valores que aparecen en la tabla 5.23, se ha hecho la media de los valores correspondientes a los cuatro ensayos de los apartados 5.10.4 y 5.10.10. Hay que hacer una salvedad: debido a la existencia de tramos con datos no válidos, en las dos carreteras fue necesario descartar parte de las trazas y no fue posible ensayar el tramo completo. Los resultados obtenidos en los tramos reconstruidos son: un error medio de 6,4 cm en la determinación de la cota de los puntos, una desviación típica de 5,5 cm y un error máximo de 28 cm, en alguno de los puntos. Esto quiere decir que la mayoría de los puntos tenían el error comprendido en el intervalo $6,4 \pm 5,5 \text{ cm}$.

Los resultados obtenidos a partir de datos del inventario de carreteras procedentes de clinómetros, aparecen como el segundo resultado con menores errores. Los datos de la tabla 5.23 son la media de los resultados de los cuatro ensayos de la tabla 5.7 del apartado 5.9. Se ha excluido el ensayo del tramo de 50 km de la M-607, por considerarlo un caso especial, que requeriría hacer la reconstrucción en base a tramos de menor longitud. Aquí también hay que hacer

una salvedad: los errores mostrados en la tabla 5.23 son la media entre resultados de tramos llanos, ondulados y montañosos. Ya se vio en el apartado 5.7 que los resultados del algoritmo de reconstrucción y de los dispositivos de toma de medidas, son peores cuanto más accidentado es el terreno. Así, mientras en la carretera N-403, entre Casas del Burguillo y El Barraco, que es terreno montañoso, se obtuvo un error medio de 43 cm (ensayo 5 de la tabla 5.7), en el tramo llano de la misma N-403 en la provincia de Toledo, el error medio fue de tan sólo 5 mm (ensayo 4 de la tabla 5.7).

En el caso de los ensayos de reconstrucción con el GPS Leica, la tabla 5.23 muestra la media de los ensayos 1 y 2 del apartado 5.10.5 que aparecen en la tabla 5.12. Se ha excluido el ensayo 3 de la misma tabla, que corresponde al eje promediado a partir de las dos trazas anteriores. El error medio de las dos reconstrucciones es de 39 cm, con un error máximo de 2 m, en algún punto del recorrido. Si bien el error medio es un 62 % superior al obtenido con clinómetros, es suficientemente aproximado para realizar la reconstrucción del trazado con calidad suficiente. Hay que destacar que este modelo de receptor tiene una antigüedad de unos diez años.

Las dos últimas líneas de la tabla 5.23 corresponden a los resultados medios obtenidos con un GPS de bajo coste y con el GPS de un teléfono móvil utilizando el programa *RoadRecorder*. Los errores medios del teléfono móvil multiplican por 1,8 los obtenidos con el GPS de gama alta, y los del receptor de bajo coste los multiplican por 3,7. Es otro orden de magnitud. De hecho, la reconstrucciones realizadas en base a los datos registrados con estos dispositivos no tienen la calidad suficiente para la reconstrucción automática. En cambio, un operador experimentado podría utilizar los resultados para realizar una reconstrucción mediante sucesivas iteraciones con el programa. El programa de reconstrucción incorpora varias utilidades en este sentido. Se trata de utilidades que permiten indicar dos o más rasantes y realizar diversas operaciones con ellas: unir las, dividir las, cambiar parámetros y otras. Pero se salen del objetivo de la tesis de realizar un algoritmo que no requiera más intervención del usuario que proporcionar el fichero de pendientes.

5.11.2 Resultados en función del tipo de terreno

Si la precisión del dispositivo es adecuada, lo que cumplen los tres tipos de dispositivos profesionales que se han analizado en el apartado anterior, la correcta identificación de los acuerdos parabólicos es la clave de la reconstrucción. En ese sentido, cuanto más accidentado es el terreno por el que discurre la carretera, hay

más variedad de acuerdos parabólicos y mayor rango relativo de variación de los parámetros de dichos acuerdos. La consecuencia de ello es que los resultados de las reconstrucciones de la geometría del perfil longitudinal son menos precisos cuanto más accidentado sea el terreno. En el apartado 5.9 se ha comprobado en los resultados de las carreteras analizadas. Mientras en terreno llano el error medio es de 5 mm, en terreno ondulado el error medio sube a 22 cm (44 veces más) y en terreno montañoso a 43 cm (86 veces más que en llano, 2 veces más que en ondulado).

La observación de los diagramas de pendientes en los casos mencionados hace sospechar que no todo el error es debido al algoritmo de reconstrucción. La mayor variación de las pendientes medidas por los dispositivos dentro de una misma alineación podría indicar que los propios clinómetros dan más error al medir variaciones rápidas de pendientes (acuerdos aguzados) que variaciones más graduales (acuerdos más tendidos).

En la parte que atañe al algoritmo de reconstrucción, cuando hay variedad de acuerdos parabólicos, una causa de la menor precisión podría ser el hecho de utilizar un solo valor de la pendiente límite y la longitud de las rectas de interpolación para todo el tramo. De hecho, si cualquiera de las carreteras ensayadas se divide en tramos más pequeños y se reconstruyen de manera independiente, el error disminuye. Así se ha hecho con el tramo montañoso de la carretera N-403 en la provincia de Ávila que se reconstruyó en el apartado 5.9.

La observación del perfil de la carretera (ver figura 5.29) permite distinguir tres tramos diferenciados en la misma. Entre $s=0$ y $S=2000$, la carretera es una pendiente descendente de forma global cóncava y acuerdos muy tendidos. Entre $S=2000$ y $S=5000$ hay fuertes rampas y pendientes, un acuerdo muy aguzado, y la forma global es convexa. Entre $S=5000$ y el final del tramo en $S=12000$, la carretera es una rampa casi continua con pequeños descansillos horizontales o en pequeña pendiente y formada por una sucesión de parejas acuerdo convexo-acuerdo cóncavo.

Se ha reconstruido el trazado dividiendo la carretera en esos tres tramos y reconstruyendo cada tramo de manera independiente. En la tabla 5.24 se han resumido los resultados. La primera línea de la tabla corresponde a los resultados que ya se obtuvieron en el apartado 5.9, en la reconstrucción del tramo completo. Las siguientes tres líneas corresponden a los resultados de cada tramo reconstruido de manera independiente. La última línea corresponde a los resultados para el tramo completo, ponderando los de cada tramo de acuerdo con su longitud.

Se puede ver que el algoritmo elige un valor diferente de la pendiente límite y la

longitud de las rectas de interpolación para cada tramo. En el primer tramo, entre $S=0$ y $S=2000$, elige una pendiente límite de $1,00 \times 10^{-5}$ que da lugar a un parámetro $K_v=100000$. Esto le permite reconstruir los acuerdos tendidos y de pequeña longitud que aparecen en el perfil. El segundo tramo, el comprendido entre $S=2000$ y $S=5000$, se reconstruye con una pendiente límite de valor $9,00 \times 10^{-5}$, que da lugar a una $K_v=11111$, más acorde con el acuerdo muy aguzado que aparece en el perfil. Para el tercer tramo, el comprendido entre $S=5000$ y $S=12000$, el algoritmo escoge una pendiente límite de valor $6,00 \times 10^{-5}$, cuyo K_v equivalente tiene un valor de 16667, un poco mayor que el del tramo anterior, y que reconstruye mejor los acuerdos algo más tendidos que aparecen en el tramo.

En cuanto a los errores de la reconstrucción de cada tramo de manera individual, en los tres casos son notablemente inferiores al error resultante de la reconstrucción del tramo completo con un solo juego de parámetros. Los resultados ponderados de los errores también son mucho menores que los del tramo completo.

Tabla 5.24: Resultados del ensayo de reconstrucción de la N-403, como un único tramo y subdividiendo en tres tramos

Tramo	R. Interpol		Errores				
	L	Pdte	Kvmax(m)	ECM	Desv(m)	Media(m)	Max(m)
Completo	140,40	$3,75 \times 10^{-5}$	26667	0,204	0,306	0,332	2,030
S=0-2000	40,11	$1,00 \times 10^{-5}$	100000	0,083	0,144	0,251	0,591
S=2000-5000	100,18	$9,00 \times 10^{-5}$	11111	0,158	0,255	0,308	1,132
S=5000-12000	40,11	$6,00 \times 10^{-5}$	16667	0,094	0,204	0,230	0,888
Ponderado				0,108	0,207	0,253	0,900

5.12 CONCLUSIONES

A lo largo de este capítulo se han realizado ensayos del algoritmo de reconstrucción en 120 000 perfiles sintéticos, los datos de proyecto del perfil longitudinal de un tramo de carretera, 5 ensayos en carreteras reales con datos de clinómetros y 27 ensayos en diferentes carreteras con datos de receptores GNSS de diferentes marcas y modelos. Las conclusiones que se pueden extraer de este estudio son las siguientes:

1. El procedimiento propuesto para la reconstrucción de perfiles funciona de manera satisfactoria, llenando un hueco que existía en relación con las herramientas para la reconstrucción de la geometría de los perfiles longitudinales de carreteras ya construidas
2. Todos los aparatos profesionales analizados tienen la precisión suficiente para realizar reconstrucciones de la geometría del perfil longitudinal de buena calidad
3. Los aparatos de bajo coste no proporcionan la precisión suficiente para hacer una reconstrucción precisa de la geometría del perfil de manera automática. Sí que proporciona, en cambio, una primera aproximación que permitiría a un operador experto realizar la reconstrucción completa mediante pequeños ajustes de los resultados del algoritmo. También se podrían obtener mejores resultados reconstruyendo en tramos de menor longitud
4. El cálculo de una traza media a partir de otras dos para el cálculo de la reconstrucción de la geometría no siempre proporciona valores más precisos que los de las trazas individuales
5. Los perfiles sintéticos son una herramienta útil para la puesta a punto y calibración de algoritmos de reconstrucción de la geometría de las carreteras.

Esta investigación abre camino a otras líneas de investigación futuras. La tramificación automática del perfil en tramos homogéneos es una de ellas. Por otra parte, los responsables de la reciente puesta en funcionamiento del sistema GNSS Galileo, de la Comisión Europea, aseguran que proporcionará mayor precisión en las medidas que los actuales GPS y Glonass. Será interesante poder probar los algoritmos con receptores que incorporen la lectura de la señal de Galileo. La imposición de determinadas restricciones a los perfiles reconstruidos podría ser otra línea de investigación. El generador de perfiles sintéticos también permite ampliaciones; quizá la más destacada sea la generación de errores aleatorios con distribución similar a la de los dispositivos reales de toma de datos.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A lo largo de esta tesis se han desarrollado diferentes herramientas matemáticas, procedimientos de trabajo y programas de ordenador destinados a la realización de inventarios físicos de carreteras y caminos. Se ha demostrado la importancia que tiene el inventariado de las carreteras y caminos para todos los tipos de vías, de agentes interesados y de situaciones diferentes que se presentan en la realidad actual de las redes de transporte terrestre. Se ha puesto especial énfasis en la posible aplicación a: (1) la realización de inventarios de bajo coste, (2) la realización de inventarios en todo tipo de vías, (3) la realización de inventarios por parte de todos los agentes interesados en los mismos, y (4) la realización de inventarios en situaciones de emergencias producidas tras catástrofes naturales y antropogénicas.

A partir del conocimiento adquirido durante la realización de la tesis y del análisis de los resultados de los ensayos que se han llevado a cabo, es posible extraer algunas conclusiones y posibles líneas futuras de investigación, que se detallan en los apartados siguientes.

6.1 CONCLUSIONES

El algoritmo de sincronización entre los vídeos y las trazas GNSS proporciona suficiente precisión para su utilización en la creación o mantenimiento de los inventarios de todo tipo de vías, proporcionando una precisión equivalente a la del receptor GNSS. A igualdad de precisión del receptor GNSS, la utilización de vídeos sincronizados con las trazas GNSS es una solución superior a la utilización de fotografías individuales cada cinco o diez metros. En un vídeo a 30fps tomado con un vehículo circulando a 50 km/h, la distancia sobre el terreno entre dos fotogramas es de 50 cm. El valor añadido por la calidad fotográfica de los fotogramas individuales no compensa al proporcionado por vídeos continuos con menor calidad fotográfica correctamente sincronizados con las trazas, que permiten asignar en gabinete las coordenadas a los elementos del inventario. En este sentido, la utilización de cámaras de bajo coste es útil para la realización de inventarios de carreteras y, en particular, la combinación de *RoadRecorder* y *RoadPlayer* es útil como método de bajo coste y de despliegue rápido para la creación y mantenimiento de inventarios. Otra conclusión de la filmación con

cámaras de reducidas dimensiones es que la colocación en el retrovisor, de forma que proporcione un encuadre parecido al de la visión del conductor, permite la identificación en gabinete de los defectos de perspectiva del trazado.

En relación con el modelo de datos propuesto para la realización de los inventarios se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- Los modelos de datos estándares existentes no resuelven de manera adecuada el inventariado de todos los tipos de vías, ni las necesidades de todos los agentes interesados en dichos inventarios, especialmente en los inventarios rápidos, como los requeridos en desastres naturales
- El modelo de datos propuesto en esta tesis doctoral proporciona una herramienta eficaz para resolver cualquier tipo de inventario de cualquier tipo de vía y destinado a cualquier uso que los agentes interesados quieran dar al inventario. Propone un esquema abierto y sencillo que facilita el desarrollo de herramientas específicas en cualquier lenguaje de programación. La flexibilidad del modelo propuesto le permite adaptarse a inventarios sencillos pero también a cualquier nivel de complejidad, utilizando la referencia lineal y la segmentación dinámica
- El modelo propuesto permite la reutilización de la información existente en un inventario para la realización de otros tipos de inventarios de la misma vía destinados a otros usos diferentes del original
- El modelo de datos propuesto permite la implementación de la norma ISO 19142 y la descripción de la geometría de la carretera
- El modelo de datos propuesto requiere un periodo corto de aprendizaje, ofrece la posibilidad de utilizar técnicas de trabajo incremental y colaborativo y se puede implementar en cualquier idioma. Estas características lo convierten en una herramienta útil en los casos de inventarios tras catástrofes
- El modelo de datos propuesto ofrece la posibilidad de ser adaptado a la normativa de carreteras de cualquier país, o a los diferentes esquemas de información necesaria para cualquier tipo de inventario
- El modelo de datos propuesto se puede integrar en las herramientas SIG existentes

Por su parte, los resultados obtenidos en los ensayos realizados con el software desarrollado para la reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal de carreteras ya existentes, permiten extraer las siguientes conclusiones:

- El procedimiento propuesto para la reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal permite alcanzar errores medios inferiores a 10 cm en la determinación de las cotas del perfil reconstruido
- Los mejores resultados de reconstrucción de la geometría del perfil

longitudinal se han obtenido a partir de los datos procedentes de receptores GNSS con corrección diferencial, por encima de los obtenidos a partir de datos de clinómetros

- Todos los aparatos profesionales analizados tienen la precisión suficiente para realizar reconstrucciones de la geometría del perfil longitudinal utilizando el algoritmo desarrollado
- La descomposición en tramos de características uniformes mejora la precisión alcanzada por el algoritmo de reconstrucción
- La utilización de más de una traza GNSS de la misma carretera proporciona una mejora de la precisión en la obtención de la proyección en planta de la misma, pero no sucede lo mismo en cuanto a la determinación de las cotas de los puntos del eje. El cálculo de una traza media a partir de otras dos para el cálculo de la reconstrucción de la geometría del perfil longitudinal, no siempre proporciona valores más precisos que los de las trazas individuales
- Los dispositivos de bajo coste analizados no proporcionan por el momento la precisión suficiente para hacer una reconstrucción suficientemente precisa de la geometría del perfil de manera automática, si bien pueden proporcionar una herramienta de ayuda para la reconstrucción de los perfiles.
- Los perfiles sintéticos han demostrado su utilidad para la puesta a punto y calibración de algoritmos de reconstrucción de la geometría de las carreteras.

6.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados permiten proponer futuras líneas de investigación acerca de los temas tratados en la tesis, entre las cuales se destacan las siguientes:

- La reciente aparición en el mercado de equipos de bajo coste del tipo drones, LIDAR o cámaras de filmación en 360° hace interesante explorar las posibilidades que ofrecen estos equipos en los inventarios de carreteras
- La toma de medidas y el reconocimiento automático de objetos en las fotografías son campos de investigación actual que podrían realizar interesantes aportes a los inventarios. Librerías de software libre como OpenCV podrían permitir la realización de herramientas de bajo coste en relación con este tema
- La incorporación de los elementos necesarios para desarrollar modelos de datos en tres dimensiones, tanto del trazado de las carreteras, como de la descripción de sus elementos (estructuras, taludes, y otros), supondría una ampliación interesante del modelo presentado en la tesis.
- Los responsables de la reciente puesta en funcionamiento del sistema GNSS Galileo, de la Comisión Europea, aseguran que proporcionará mayor precisión en las medidas que los actuales GPS y Glonass. Será interesante poder probar los algoritmos con receptores que incorporen la lectura de la señal de Galileo. Al aumentar la precisión de los dispositivos de bajo coste podría dotarlos de mayor utilidad para la reconstrucción de la geometría de las carreteras

7. REFERENCIAS

Agudelo Zapata, J.A. (2014). Cómo obtener las frecuencias fundamentales de una estructura con tu Smartphone | Estructurando.

URL <http://estructurando.net/2014/06/23>

(Último acceso en mayo de 2017)

Andrea Antonello and contributors (2016). Geopaparazzi Reference Manual.

URL <https://geopaparazzi.github.io/geopaparazzi/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Anguix, A. (2016). gvSIG Roads: Gestión integral de carreteras con software libre.

URL <http://www.gvsigroads.com/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Apache Foundation (2008). Maven: software project management and comprehension tool.

URL <https://maven.apache.org/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Apache Software Foundation (2016). Apache Commons.

URL <http://commons.apache.org/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Argerich, A.I.; Montivero, M.E. and Mansilla, R.R. (2012). ISO/TC 211 y las Normas de la Información Geográfica. In *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)*, chap. 19. UPM Press. ISBN 978-84-939196-6-5.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2017). AENOR.

URL <http://www.en.aenor.es/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Axmark, D.; Larsson, A. and Widenius, M. (1994). MySQL.

URL <https://www.mysql.com/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Baass, K. and Vouland, J. (2005). Détermination de l'alignements routier à partir de traces GPS. *Congrès annuel 2005 de l'ATC (Calgari, Alberta)*.

Bai, L. and Wang, Y. (2008). Fusing Image, GPS and GIS for Road Tracking Using Multiple Condensation Particle Filters. *2008 IEEE INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM, VOLS 1-3*, pp. 934–939. ISSN 1931-0587.

- Balali, V.; Asce, S.M.; Golparvar-fard, M. and Asce, A.M.** (2015a). Evaluation of Multi-Class Traffic Sign Detection and Classification Methods for U.S. Roadway Asset Inventory Management. *Journal of Computing in Civil Engineering*.
- Balali, V. and Golparvar-Fard, M.** (2015). Segmentation and recognition of roadway assets from car-mounted camera video streams using a scalable non-parametric image parsing method. *Journal of Automation in Construction*, vol. 49 pp. 27–39. ISSN 0926-5805. doi:10.1016/j.autcon.2008.03.002.
- Balali, V.; Rad, A.A. and Golparvar-Fard, M.** (2015b). Detection, Classification, and Mapping of U.S. Traffic Signs Using Google Street View Images for Roadway Inventory Management. *Journal of Visualization in Engineering*, vol. 3(15) pp. 1–18.
- Barriga Vargas, R.; Andrade Leiva, C. and Lazo, J.M.** (2012). Almacenamiento de la información geográfica. In *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)*, chap. 7, pp. 107–116. UPM Press. ISBN 978-84-939196-6-5.
- Beiglboeck, K.** (2011). *Programming gps and openstreetmap applications with Java: The real object application framework*. A K Peters/CRC Press. ISBN 9781466507180.
- Bennet, J.** (2010). *OpenStreetMap. Be your own cartographer*. Packt Publishing Ltd.
URL <https://www.packtpub.com/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Bennett, G.; King, E.A.; Curn, J.; Cahill, V.; Bustamante, F. and Rice, H.J.** (2010). Environmental noise mapping using measurements in transit. *Proceedings of ISMA2010 - International Conference on Noise and Vibration Engineering Including USD2010*, pp. 1795–1809.
- Bentley** (2014). InRoads Suite: A comprehensive solution for transportation design.
URL <http://www.bentley.com/es-ES/Products/InRoads+Suite/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Bermudez, L.E.; Masó Pau, J. and Capdevila Subirana, J.** (2012). Open Geospatial Consortium (OGC). In UPM Press, ed., *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)*, chap. 20, p. 265. UPM Press. ISBN 978-84-939196-6-5.
- Bernabé Poveda, M.A. and López Vázquez, C.M.** (2012). *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales(IDE)*. UPM Press, Madrid, 1ª ed. ISBN 9788493919665.

- Boroujeni, B.Y.; Frey, H.C. and Sandhu, G.S.** (2013). Road Grade Measurement Using In-Vehicle, Stand-Alone GPS with Barometric Altimeter. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 139(6) pp. 605–611. ISSN 0733-947X. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000545.
- Boucher, C.** (2013). Fusion of GPS, OSM and DEM data for estimating road network elevation. In *Proceedings - 5th International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems, and Networks, CICSyN 2013*, pp. 273–278.
- Bröring, A.; Stasch, C. and Echterhoff, J.** (2012). OGC Sensor Observation Service. *Tech. rep.*, Open Geospatial Consortium.
URL <http://www.opengeospatial.org/standards/sos>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Bujari, A.; Licar, B. and Palazzi, C.E.** (2011). Road crossing recognition through smartphone's accelerometer. In *2011 IFIP Wireless Days (WD)*, pp. 1–3. IEEE. ISBN 978-1-4577-2028-4. ISSN 2156-9711. doi:10.1109/WD.2011.6098186.
URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/6098186/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Bujari, A.; Licar, B. and Palazzi, C.E.** (2012). Movement pattern recognition through smartphone's accelerometer. In *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2012 IEEE*, pp. 502–506. ISSN Pending. doi: 10.1109/CCNC.2012.6181029.
- Bump Recorder Co., L.** (2013). BumpRecorder - Android Apps on Google Play.
URL <https://play.google.com/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Butler, H.; Schmidt, C.; Springmeyer, D. and Livni, J.** (2013). Spatial Reference.
URL <http://spatialreference.org/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Cafiso, S. and Graziano, A.D.** (2008). Automated in-vehicle data collection and treatment for existing roadway alignment. *CRC Press: Efficient Transportation and Pavement Systems*, vol. ISBN: 978- p. Chapter 73.
- Camacho-Torregrosa, F.J.; Pérez-Zuriaga, A.M.; Campoy-Ungría, J.M.; García, A. and Tarko, A.P.** (2015). Use of Heading Direction for Recreating the Horizontal Alignment of an Existing Road. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 00 pp. 1–18. ISSN 10939687. doi:10.1111/mice.12094.
URL <http://doi.wiley.com/10.1111/mice.12094>
(Último acceso en mayo de 2017)

- Campbell, F.; Ogle, J.H.; Rhoades, J.; Sarasua, W.A. and Chowdhury, M.A.** (2007). Evaluation of Methods for Determining Horizontal Road Design Data Using an Instrumented Vehicle Equipped with Satellite Differentially Corrected GPS. *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*, vol. 2670.
- Caprica Software** (2016). VLCJ: Java bindings and an application framework for the VLC media player from VideoLAN.
URL <http://capricasoftware.co.uk/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Carlson, P.J.; Burris, M.; Black, K. and Rose, E.R.** (2005). Comparison of Radius-Estimating Techniques for Horizontal Curves. *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1(1918) pp. 76–83.
- Castro, M.; Iglesias, L.; Rodríguez-Solano, R. and Sánchez, J.A.** (2006). Geometric modelling of highways using global positioning system (GPS) data and spline approximation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 14(4) pp. 233–243. ISSN 0968-090X. doi:10.1016/j.trc.2006.06.004.
- Castro, M.; Iglesias, L.; Sánchez, J.A. and Ambrosio, L.** (2011). Sight distance analysis of highways using GIS tools. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 19(6) pp. 997–1005. ISSN 0968090X. doi:10.1016/j.trc.2011.05.012.
- Centro Nacional de Información Geográfica** (2007). Rejilla para cambio de Datum entre ED50 y ETRS89 (en formato NTV2).
URL <http://www.ign.es/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Centro Nacional de Información Geográfica** (2016). PNOA: PPlan Nacional de Ortofotografía Aérea.
URL <http://centrodedescargas.cnig.es/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Centro Nacional de Información Geográfica** (2017). MTN25 VECTORIAL.
URL <http://centrodedescargas.cnig.es/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Chacon, S. and Straw, B.** (2014). *Pro GIT: Everything you need to know about GIT*. Apress Open. ISBN 978-1484200773.
- Charles Darwin Foundation** (2014). Google returns to Galapagos.
URL <http://www.darwinfoundation.org/>
(Último acceso en mayo de 2017)

Chen, A.Y.; Peña-Mora, F. and Ouyang, Y. (2011). A collaborative GIS framework to support equipment distribution for civil engineering disaster response operations. *Automation in Construction*, vol. 20(5) pp. 637–648. ISSN 09265805. doi:10.1016/j.autcon.2010.12.007.

URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2010.12.007>

China National Space Administration (2016). BeiDou Navigation Satellite System.

URL <http://en.beidou.gov.cn/index.html>

(Último acceso en mayo de 2017)

City of Boston (2012). Street Bump on the App Store.

URL <https://itunes.apple.com/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Coast, S. (2004). OpenStreetMap Foundation Wiki.

URL <https://wiki.osmfoundation.org>

(Último acceso en mayo de 2017)

Comité Técnico AEN/CTN (2012). *Información Geográfica: Referencia Lineal*. AENOR.

Creative Commons (2017). Creative Commons — Atribución-CompartirIgual 3.0 España — CC BY-SA 3.0 ES.

URL <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/deed.es>

(Último acceso en mayo de 2017)

Cunningham, C.M. and Findley, D.J. (2013). Comparison of Mobile Asset Data Collection Vehicles to Manual Collection Methods Comparison of Mobile Asset Data Collection Vehicles. *Tech. Rep. February 2013*, Department of Transportation. State of North Carolina.

Da Rocha, G. (2016). *Learning SQLite for iOS*. Packt Publishing Ltd. ISBN 9781785288975.

David Ben-Arieh, S.C. and Zhang, G. (2004). Geometric Modeling of Highways using GPS data and B-Spline. *Journal of transportation engineering-asce*, vol. 130 (5)(MAY 2004) pp. 632–636.

Degray, J. and Hancock, K.L. (2002). Ground-based image and data acquisition systems for roadway inventories in New England: a synthesis of highway practice. *Tech. rep.*, New England Transportation Consortium.

- Di Mascio, P.; Di Vito, M.; Loprencipe, G. and Ragnoli, A.** (2012). Procedure to Determine the Geometry of Road Alignment Using GPS Data. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 53(0) pp. 1202–1215. ISSN 18770428. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.969.
- Dirección General de Carreteras** (2008). Señalización del Camino de Santiago.
- Dirección General de Tráfico** (2016). RSS de las incidencias de Tráfico.
URL <http://infocar.dgt.es/etraffic/jsp/rss.jsp>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Dong, H.; Easa, S.M. and Li, J.** (2007). Approximate Extraction of Spiralled Horizontal Curves from Satellite Imagery. *Journal of Surveying Engineering*, vol. 133(1) pp. 36–40. ISSN 0733-9453. doi:10.1061/(ASCE)0733-9453(2007)133:1(36).
URL <http://ascelibrary.org/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Draheim, A.** (2016). *Data Standard for Road Management and Investment in Australia and New Zealand: Version 1*. Austrorads Ltd. ISBN 978-1-925451-43-6.
- Drakopoulos, A. and Örnek, E.** (2000). Use of Vehicle-Collected Data to Calculate Existing Roadway Geometry.
- DVMP** (2016). DVMP Pro 6 - Time Stamping Your Video Files.
URL <http://www.dvmp.co.uk/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Easa, S.M.; Dong, H. and Li, J.** (2007). Use of Satellite Imagery for Establishing Road Horizontal Alignments. *Journal of Surveying Engineering*, vol. 133(1) pp. 29–35. ISSN 0733-9453. doi:10.1061/(ASCE)0733-9453(2007)133:1(29).
- Easa, S.M. and Kikuchi, S.** (2009). Generalized Method for Estimating Best-Fit Vertical Alignments for Profile Data. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, vol. 3(9).
- Easa, S.M. and Wang, F.** (2010). Estimating continuous highway vertical alignment using the least-squares method. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 37(10) pp. 1362–1370. ISSN 0315-1468. doi:10.1139/L10-088.
URL <http://dx.doi.org/10.1139/L10-088>
- Environmental System Research Institute** (1998). *ESRI Shapefile Technical Description: an ESRI White Paper*. ESRI.

Environmental System Research Institute (2016). ESRI Roads and Highways.

URL <http://www.esri.com/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Environmental Systems Research Institute (1998). Shapefiles.

Environmental Systems Research Institute, I. (2016). Qué es la referencia lineal.

URL <http://desktop.arcgis.com/>

(Último acceso en mayo de 2017)

ERA Foundation (2004). EURORANDO 2011.

URL <http://www.era-ewv-ferp.com/frontpage/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Erik Solem, J.; Gyllenspetz, J. and Neubauer, P. (2013). Mapillary. Crowdsourced Street Photos.

URL <https://legacy.mapillary.com/map>

(Último acceso en mayo de 2017)

Eriksson, J.; Girod, L.; Hull, B.; Newton, R.; Madden, S. and Balakrishnan, H. (2008). The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring. *MobiSys '08 : Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services*, pp. 29–39. doi:10.1145/1378600.1378605.

European Comission (2007a). D2.8.I.5 Data Specification on Transport Networks – Technical Guidelines. *Tech. rep.*, INSPIRE: Infrastructure for Spatial Information in Europe.

European Comission (2007b). INSPIRE: Infrastructure for Spatial Information in the European Community.

URL <http://inspire.ec.europa.eu/>

(Último acceso en mayo de 2017)

European GNSS Agency (2016). European Global Navigation Satellite Systems Agency.

URL <https://www.gsa.europa.eu/>

Evenden, G.I. (1990). *Cartographic Projection Procedures for the UNIX Environment - A User's Manual*. United States Department of the Interior Geological Survey.

- Federal Highway Administration** (2009). *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*. US Department of Transportation. ISBN 0935403817.
URL <http://mutcd.fhwa.dot.gov/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Fernández-Coppel, I.a.** (2001). *Las Coordenadas Geográficas y la Proyección UTM*. Universidad de Valladolid.
URL <http://www.cartesia.org/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Findley, D.J.; Hummer, J.E.; Rasdorf, W. and Laton, B.T.** (2013). Collecting Horizontal Curve Data: Mobile Asset Vehicles and Other Techniques. *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 19(1) pp. 74–84.
- Finnish National Authority** (2016). Inframodel.
URL <http://www.inframodel.fi/en/>
- Foster, D.** (2004). GPX: the GPS Exchange Format.
URL <http://www.topografix.com/gpx.asp>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Fowler, M.** (1999). *Refactoring: Improving the Design of Existing Code*. Addison-Wesley Professional. ISBN 9780201485677.
- Franchin, P.; Lupoi, A. and Pinto, P.e.** (2006). On the role of road networks in reducing human losses after earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 10(2) pp. 195–206. doi:10.1080/13632460609350593.
- Gajjar, M.J.** (2017). *Mobile Sensors and Context-Aware Computing*. Elsevier. Jonathan Simpson. ISBN 9780128016602.
- Gamma, E. and Beck, K.** (2014). JUnit.
URL <http://junit.org/junit4/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Gamma, E.; Johnson, R.; Vlissides, J. and Helm, R.** (1994). *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley Professional. ISBN 9780201633610.
- Ganeshan, R.; Grobler, F.; Coimbatore, V. and Eric Wang, C.Y.** (2001). CITYWORK: Application of Collaborative Technologies for Infrastructure Management. *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 15(January) pp. 74–80.

- Garach, L.; de Oña, J. and Pasadas, M.** (2014a). Determination of alignments in existing roads by using spline techniques. *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 102(0) pp. 144–152. ISSN 0378-4754. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.matcom.2013.12.003>.
- Garach, L.; de Oña, J. and Pasadas, M.** (2014b). Mathematical formulation and preliminary testing of a spline approximation algorithm for the extraction of road alignments. *Automation in Construction*, vol. 47 pp. 1–9. ISSN 09265805. doi:10.1016/j.autcon.2014.07.002.
- García García, A. and Camacho Torregrosa, F.J.** (2009). Evaluación de la seguridad vial de carreteras convencionales mediante la determinación de la consistencia de global de su diseño geométrico. *Carreteras*, vol. 163(Ene-Feb 2009) pp. 21–30.
- Garmin** (2016). Garmin nuvi 2565RT PND.
URL <https://goo.gl/d1rT7T>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Gary James Silva** (2014). Imageotag - Android Apps on Google Play.
URL <https://play.google.com/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Gikas, V. and Stratakis, J.** (2011). A novel geodetic engineering method for accurate and automated road/railway centerline geometry extraction based on the bearing diagram and fractal behavior. *2011.*, vol. 13(1) pp. 115–126.
- Gilbert, D.** (2000). JFreeChart.
URL <http://www.jfree.org/jfreechart/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Ginige, A.; Paolino, L.; Romano, M.; Sebillo, M.; Tortora, G. and Vitiello, G.** (2014). Information Sharing Among Disaster Responders - An Interactive Spreadsheet-Based Collaboration Approach. *Computer Supported Cooperative Work*, vol. 23(4-6) pp. 547–583. ISSN 15737551. doi:10.1007/s10606-014-9207-0.
- Google** (2016). SensorEvent | Android Developers.
URL <https://developer.android.com/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Google** (2017). Google Street View Understand.
URL <https://www.google.com/streetview/understand/>
(Último acceso en mayo de 2017)

- Google, O.G.C.** (2015). Keyhole Markup Language (KML) 2.3.
URL <http://www.opengeospatial.org/standards/kml>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Google Inc** (2014). Google Earth.
URL <https://www.google.com/earth/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Google Maps** (2016). Street View Treks: Galápagos Islands.
URL <https://www.google.com/maps/about/behind-the-scenes/streetview/treks/galapagos-islands/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- GoPro** (2017). GoPro Official Website.
URL <https://gopro.com/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- gvSIG, A.** (2004). gvSIG.
URL <http://www.gvsig.com/es>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Halfawy, M.R.** (2010). Municipal information models and federated software architecture for implementing integrated infrastructure management environments. *Automation in Construction*, vol. 19(4) pp. 433–446. ISSN 09265805. doi:10.1016/j.autcon.2009.11.013.
- Hawkins, I.** (2010a). Torque Pro (OBD2 / coche).
URL <https://play.google.com/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Hawkins, I.** (2010b). Torque — OBD2 Performance and Diagnostics for your Vehicle.
URL <https://torque-bhp.com/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Herrera, J.C.; Work, D.B.; Herring, R.; Ban, X.J.; Jacobson, Q. and Bayen, A.M.** (2010). Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: The Mobile Century field experiment. *Transportation Research Part C- Emerging Technologies*, vol. 18(4) pp. 568–583. ISSN 0968-090X. doi:10.1016/j.trc.2009.10.006.
- Higuera de Frutos, S.** (2015a). GPXParser: Extensión del formato de datos GPX que permite incorporar a los puntos información procedente de sensores.
URL <https://github.com/shiguera/gpxparser>
(Último acceso en mayo de 2017)

Higuera de Frutos, S. (2015b). TrackMap.

URL <https://github.com/shiguera/trackmap>

(Último acceso en mayo de 2017)

Higuera de Frutos, S. (2016). Cartografía colaborativa: Digital Humanitarians.

URL <http://mercatorlab.com/masterdesastres/#/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Higuera de Frutos, S. (2017). Repositorio público de software en Github de SantiagoHiguera.

URL <https://github.com/shiguera>

(Último acceso en mayo de 2017)

Higuera de Frutos, S. and Castro, M. (2014). Using smartphones as a very low-cost tool for road inventories. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 38 pp. 136–145. ISSN 0968090X. doi:10.1016/j.trc.2013.11.012.

Higuera de Frutos, S. and Castro, M. (2016). Databases for Road Inventories. Proposal for a New Model. In *XII Conference on Transport Engineering*, pp. 1286–1293.

Hipp, R. (2000). SQLite: SQL Database Engine.

URL <https://sqlite.org/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Humanitarian OpenStreetMap Team (2016). Humanitarian OpenStreetMap Team.

URL <https://hotosm.org/>

(Último acceso en mayo de 2017)

IGN. Grupo de trabajo de Redes e Infraestructuras del Transporte (2015). Especificaciones de producto de redes de transporte del Instituto Geográfico Nacional.

Imran, M. and Hassan, Y. (2006). GPS–GIS-Based Procedure for Tracking Vehicle Path on Horizontal Alignments. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 21 pp. 383–394.

Instituto Geográfico Nacional (2017). Sistemas Geodésicos de Referencia.

URL <https://www.ign.es/>

(Último acceso en mayo de 2017)

International Association of Oil and Gas Producers (2017). EPSG Dataset.

URL <http://www.epsg.org/>

(Último acceso en mayo de 2017)

International Business Machines Corporation (1970). IBM DB2 - Database software.

URL <https://www.ibm.com/analytics/us/en/technology/db2/>

(Último acceso en mayo de 2017)

International Organization for Standardization (2004). *ISO 8601:2004 - Data elements and interchange formats - Information interchange - Representation of dates and times*. International Organization for Standardization.

URL <https://www.iso.org/standard/40874.html>

(Último acceso en mayo de 2017)

International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission (2004). ISO/IEC 15444 : JPEG 2000 image coding system.

URL <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:15444:-1:ed-2:v1:en>

(Último acceso en mayo de 2017)

International Organization for Standardization (2004a). ISO 19125-1:2004 - Geographic information – Simple feature access – Part 1: Common architecture. *Tech. rep.*, International Organization for Standardization.

URL <https://www.iso.org/standard/40114.html>

(Último acceso en mayo de 2017)

International Organization for Standardization (2004b). ISO 19125-2:2004 - Geographic information – Simple feature access – Part 2: SQL option.

URL <https://www.iso.org/standard/40115.html>

(Último acceso en mayo de 2017)

Internet and Television Association (2013). How Google Tracks Traffic.

URL <https://www.ncta.com/platform/broadband-internet/how-google-tracks-traffic/>

(Último acceso en mayo de 2017)

INVAR Ingeniería (2014). Road Speed Inspector.

URL <https://play.google.com/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Isytec Tecnología fácil (2012). Google traffic lo hacemos todos.

URL <http://isytec.net/google-traffic-lo-hacemos-todos/>
(Último acceso en mayo de 2017)

Jalayer, M.; Zhou, H.; Gong, J.; Hu, S. and Grinter, M. (2014). A Comprehensive Assessment of Highway Inventory Data Collection Methods for Implementing Highway Safety Manual. *Journal of the Transportation Research Forum*, vol. 53(2) pp. 73–92.

Japan Electronic Industry Association (2012). Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif Version 2.3. *Tech. rep.*, Japan Electronic Industry Association.

Jiménez, F.; Aparicio, F. and Estrada, G. (2009). Measurement uncertainty determination and curve-fitting algorithms for development of accurate digital maps for advanced driver assistance systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 17(3) pp. 225–239. ISSN 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2008.10.004.

Karamanou, A.; Papazissi, K.; Paradissis, D. and Psarianos, B. (2009). Precise Estimation of Road Horizontal and Vertical Geometric Features Using Mobile Mapping Techniques. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, vol. 15(5) pp. 762–775. ISSN 1413-4853.

Kayondo, L.M.; Bax, G. and Togboa, S.T. (2011). Low Cost Methodology for Preliminary Road Maintenance Decision Support. *1st Conference on Advances in Geomatics Resaerch, Kampala (Blekinge Institute of Technology)*.

Khan, J.F.; Bhuiyan, S.M.A. and Adhami, R.R. (2011). Image Segmentation and Shape Analysis for Road-Sign Detection. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12(1) pp. 83–96.

Khattak, A.J.; Hummer, J.E. and Karimi, H.A. (2000). New and Existing Roadway Inventory Data Acquisition Methods. *Journal of Transportation and Statistics*, vol. 3(3) p. 115.

Kopitz, D. and Marks, B. (1999). *RDS : the radio data system*. Artech House. ISBN 0890067449.

URL <https://books.google.es/>
(Último acceso en mayo de 2017)

Kraemer, C.; Pardillo, J.M.; Rocci, S.; Romana, M.G.; Blanco, V.S. and del Val, M.Á. (2009). *Ingeniería de carreteras (Volumen I) 2ª Edición*. McGraw-Hill.

- Kumar, R.; Mukherjee, A. and Singh, V.P.** (2017). Traffic noise mapping of Indian roads through smartphone user community participation. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 189(1) p. 17. ISSN 0167-6369. doi:10.1007/s10661-016-5741-1.
- Kumar Aditya, S. and Kumar Karn, V.** (2014). *Android SQLite Essentials*. Packt Publishing Ltd. ISBN 9781783282951.
- LandXML.org** (2016). LandXML.
URL <http://landxml.org>
(Último acceso en mayo de 2017)
- LandXML.org Industry Consortium** (2008). LandXML 1.2 Schema.
URL <http://www.landxml.org/schema/LandXML-1.2/landxml-1.2.xsd>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Lars Forslf** (2013). Roadroid.
URL <http://www.roadroid.com/Home/About>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Lee, U. and Gerla, M.** (2010). A survey of urban vehicular sensing platforms. *Computer Networks*, vol. 54(4) pp. 527–544. ISSN 13891286. doi:10.1016/j.comnet.2009.07.011.
- Ley, B.; Ludwig, T.; Pipek, V.; Randall, D.; Reuter, C. and Wiedenhoefer, T.** (2014). Information and Expertise Sharing in Inter-Organizational Crisis Management. *Computer Supported Cooperative Work*, vol. 23(4-6) pp. 347–387. ISSN 15737551. doi:10.1007/s10606-014-9205-2.
- Limsoonthrakul, S.; Dailey, M.N. and Pamichkun, M.** (2009). Intelligent Vehicle Localization Using GPS, Compass, and Machine Vision. *IEEE RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis*, pp. 3981–3986. doi:10.1109/IROS.2009.5354042.
- Liu, X.; Zhu, Y.; Wang, Y.; Forman, G.; Ni, L.M.; Fang, Y. and Li, M.** (2012). Road Recognition using Coarse-grained Vehicular Traces. *Tech. rep.*, Hewlet Packard.
- Mart, E.D.; Martn, D.; Garca, J.; de la Escalera, A.; Molina, J.M. and Armingol, J.M.** (2012). Context-aided sensor fusion for enhanced urban navigation. *Sensors (Switzerland)*, vol. 12(12) pp. 16802–16837. ISSN 14248220. doi:10.3390/s121216802.
- Martnez Llario, J.C.** (2012). *Postgis 2: Anlisis espacial avanzado*. Cartosig UPV.

Mederos, L. (2007). *Navegación astronómica*. Ediciones Tutor S.A. ISBN 978-84-16676-08-8.

Mednis, A.; Strazdins, G.; Zviedris, R.; Kanonirs, G. and Selavo, L. (2011). Real Time Pothole Detection using Android Smartphones with Accelerometers. *7th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Barcelona, SPAIN*, pp. 1–6.

Meier, P. (2015). *Digital Humanitarians: How big data is changing the face of Humanitarian Response*. CRC Press. ISBN 9781482248395.

Menard, T.; Miller, J.; Nowak, M. and Norris, D. (2011). Comparing the GPS Capabilities of the Samsung Galaxy S, Motorola Droid X, and the Apple iPhone for Vehicle Tracking Using FreeSim Mobile. *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Campus George Washington Univ (GWU), Washington, DC*, pp. 985–990. ISSN 2153-0009.

Microsoft (1989). SQL Server.
URL <https://www.microsoft.com/>
(Último acceso en mayo de 2017)

Miller, K.; Sullivan, S.; Conway, S.; Romanda, J.; Opala, M. and Squires, T. (2009). OpenCSV.
URL <http://opencsv.sourceforge.net/>
(Último acceso en mayo de 2017)

Ministerio de Fomento (2009a). *Inventario de características geométricas y de equipamiento: Manual de Criterios*. Ministerio de Fomento (España).

Ministerio de Fomento (2009b). *Inventario de características geométricas y de equipamiento. Manual de síntesis*. Ministerio de Fomento (España).

Ministerio de Fomento (2009c). *Inventario de características geométricas y de equipamiento: Manuel de variables*. Ministerio de Fomento (España).

Ministerio de Fomento (2014). *Norma81/IC: Señalización vertical*. Ministerio de Fomento (España).

Ministerio de Fomento (2016). Norma 3.1- IC Trazado, de la Instrucción de Carreteras.

Ministerio de la Presidencia de España and Ministerio de Fomento (2007). Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España.

Moteff, J. and Parfomak, P. (2004). Critical Infrastructure and Key Assets: Definition and Identification. *Tech. rep.*, Library of Congress Washington DC Congressional Research Service.

National Imagery Mapping Agency (2000). *Department of Defense World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*. NIMA. ISBN NSN 7643-01-402-0347.

National Oceanic and Atmospheric Agency (2016). GPS.gov.

URL <http://www.gps.gov/>
(Último acceso en mayo de 2017)

Obe, R.O. and Hsu, L.S. (2011). *Postgis in action*. Manning Publications C.O.

Official Google Blog (2013). Google Maps and Waze, outsmarting traffic together.

URL <https://googleblog.blogspot.com.es/2013/06/google-maps-and-waze-outsmarting.html>
(Último acceso en mayo de 2017)

Olaya, V. (2016). *Sistemas de Información Geográfica*. CreateSpace Independent Publishing Platform. ISBN 978-1530295944.

Omniscale GmbH and Co. KG (2015). Mapoxy.

URL <https://mapproxy.org/>
(Último acceso en mayo de 2017)

Omniscale GmbH and Co. KG (2016). Imposm.

URL <http://imposm.org/>
(Último acceso en mayo de 2017)

Open Geospatial Consortium (2015). OGC-KML 2.3.

URL <http://www.opengeospatial.org/standards/kml>
(Último acceso en mayo de 2017)

Open Source Geospatial Foundation (2002). GeoTools: The Open Source Java GIS Toolkit.

URL <http://www.geotools.org/>
(Último acceso en mayo de 2017)

Open Source Geospatial Foundation (2016). GDAL - Geospatial Data Abstraction Library.

URL <http://www.gdal.org/>
(Último acceso en mayo de 2017)

OpenGeospatial Consortium (2016). Geography Markup Language.

URL <http://www.opengeospatial.org/standards/gml>

(Último acceso en mayo de 2017)

OpenStreetMap (2010). Video mapping.

URL http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Video%5C_mapping

(Último acceso en mayo de 2017)

OpenStreetMap (2013). OSM API v0.6.

URL http://wiki.openstreetmap.org/wiki/API_v0.6

(Último acceso en mayo de 2017)

OpenStreetMap (2015). Road Sign Plugin for JOSM.

URL <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/JOSM/Plugins/RoadSigns>

(Último acceso en mayo de 2017)

OpenStreetMap (2016). JOSM.

URL <https://josm.openstreetmap.de/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Oracle Corporation (1977). Database 12c.

URL <https://www.oracle.com/database/index.html>

(Último acceso en mayo de 2017)

Ortiz, G. (2004). Aprende a convertir coordenadas geográficas en UTM y UTM en geográfica.

URL <http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=058a>

(Último acceso en mayo de 2017)

OSGEO (2006). Open Source Geospatial Foundation.

URL <http://www.osgeo.org/>

(Último acceso en mayo de 2017)

OSGEO: Open Source Geospatial Foundation (2002). QGIS: A Free and Open Source Geographic Information System.

URL <http://www.qgis.org/en/site/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Ozbek, M.E.; De la Garza, J.M. and Triantis, K. (2010). Data and Modeling Issues Faced during the Efficiency Measurement of Road Maintenance Using Data Envelopment Analysis. *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 16:1(21) pp. 21–30. doi:10.1061/(ASCE)1076-0342(2010)16.

- Perakovic, D.; Remenar, V. and Jovovic, I.** (2009). Application Development for Geo-Referenced Audio Video Recording of the Traffic System Using Mobile Phones. *Annals of DAAAM and Proceedings*, vol. January.
- Pérez Santiago, A.** (2012). *OpenLayers Cookbook*. Packt Publishing.
- Pérez Zuriaga, A.M.** (2012). Caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales a partir de la observación naturalística de la evolución de vehículos ligeros. Ph.D. thesis, Universitat Politècnica de València.
- Phil Harvey** (2017). ExifTool.
URL [http://www.sno.phy.queensu.ca/~sim\\$phil/exiftool/](http://www.sno.phy.queensu.ca/~sim$phil/exiftool/)
(Último acceso en mayo de 2017)
- Portele, C.; Cox, S.J.D.; Daisey, P.; Lake, R. and Whiteside, A.** (2007). OpenGIS® Geography Markup Language (GML) Encoding Standard. *OGC Implementation Specification*, vol. 07-036 pp. viii + 426.
URL <http://portal.opengeospatial.org/files/20509>
(Último acceso en mayo de 2017)
- PostgreSQL Global Development Group** (1986). PostgreSQL: The world's most advanced open source database.
URL <https://www.postgresql.org/about/licence/>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Pourabdollah, A.; Morley, J.; Feldman, S. and Jackson, M.** (2013). Towards an Authoritative OpenStreetMap: Conflating OSM and OS OpenData National Maps' Road Network. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 2(3) pp. 704–728. ISSN 2220-9964. doi:10.3390/ijgi2030704.
- Proulx, F.R.; Zhang, Y. and Grembek, O.** (2014). A Database for Active Transportation Infrastructure and Volume. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2527. doi:10.3141/2527-11.
- Puente, I.; González-Jorge, H.; Martínez-Sánchez, J. and Arias, P.** (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, vol. 46(7) pp. 2127–2145. ISSN 02632241. doi:10.1016/j.measurement.2013.03.006.
- Puy, J.** (2016). Trivium: Manual del usuario.
- Qadeer, M.A.; Akhtar, N.; Khan, F. and Baratte, E.** (2009). Improving Real-Time GPS by incorporating TelegraphCQ in Jandroid Architecture. *4th International Symposium on Wireless Pervasive Computing, Melbourne, Australia*, pp. 195–199.

Radio Nacional de España (2016). RNE: Sistema RDS.

URL <http://www.rtve.es/rne/emisoras/rds/rds.htm>

(Último acceso en mayo de 2017)

Raifer, M. (2014). Overpass Turbo.

URL <https://overpass-turbo.eu/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Rails-to-Trails Conservancy (1986). Washington Walking Trails | TrailLink.

URL <http://www.traillink.com/stateactivity/wa-walking-trails.aspx>

(Último acceso en mayo de 2017)

Ramm, F.; Topf, J. and Chilton, S. (2011). *OpenStreetMap: using and enhancing the free map of the world*. UIT Cambridge Ltd.

URL <http://www.openstreetmap.info/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Ramsey, P.; Santilli, S.; Obe, R.; Cave-Ayland, M. and Park, B. (2001). Postgis: Spatial and Geographic objects for PostgreSQL.

URL <http://postgis.net/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Rasdorf, W.; Hummer, J.E.; Harris, E.A. and Sitzabee, W.E. (2009). IT Issues for the Management of High Quantity , Low Cost Assets. *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 23:2(91) pp. 91–99.

Rebolj, D.; Tibaut, A.; Čuš-Babič, N.; Magdič, A. and Podbreznik, P. (2008). Development and application of a road product model. *Automation in Construction*, vol. 17(6) pp. 719–728. ISSN 09265805. doi:10.1016/j.autcon.2007.12.004.

Rodríguez Pascual, A.F. and Bernabé Poveda, M.Á. (2012). Compartir datos Geográficos. In *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)*, chap. 1. UPM Press, Madrid (Spain). ISBN 978-84-939196-6-5.

Russian Federal Space Agency (2016). Information analytical centre of GLONASS and GPS controlling.

URL <https://www.glonass-iac.ru/en/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Sanguesa, J.A.; Fogue, M.; Garrido, P.; Martinez, F.J.; Cano, J.C.; Calafate, C.T. and Manzoni, P. (2013). An Infrastructureless Approach to Estimate Vehicular Density in Urban Environments. *Sensors*, vol. 13 pp. 2399–2418.

- Saura López, F.J.; Yarza Álvarez, P. and Aliseda Pérez De Madrid, P.** (2010). Sistema avanzado para la revisión e inspección de la seguridad de infraestructuras viarias. *Carreteras*, vol. 4(172) pp. 54–65.
- Schafer, W.A.; Ganoë, C.H. and Carroll, J.M.** (2007). Supporting community emergency management planning through a geocollaboration software architecture. *Computer Supported Cooperative Work*, vol. 16(4-5) pp. 501–537. ISSN 15737551. doi:10.1007/s10606-007-9050-7.
- Schneider, R.; Patton, R.; Toole, J. and Raborn, C.** (2005). Pedestrian and Bicycle Data Collection in United States Communities: Quantifying Use, Surveying Users, and Documenting Facility Extent. *Tech. Rep. January*, Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation.
- Shafranovich, Y.** (2005). Common Format and MIME Type for Comma-Separated Values (CSV) Files.
URL <https://www.ietf.org/rfc/rfc4180.txt>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Singh, S.; Nelakuditi, S.; Roy Choudhury, R. and Tong, Y.** (2012). Your smartphone can watch the road and you: mobile assistant for inattentive drivers. *MobiHoc '12: Proceedings of the thirteenth ACM international symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 261–262. doi:10.1145/2248371.2248415.
- Sony** (2017). Action Cameras | Action Cam Sports Cameras | Sony US.
URL <http://www.sony.com/electronics/action-cam/t/action-cam>
(Último acceso en mayo de 2017)
- Svard, T.** (2006). *Deliverable D 6.5: Final specification of core European road data*. EuroroadS. National Land Survey of Sweden.
- Technical Committee ISO/TC 211** (2012). *ISO 19148:2012 - Geographic information – Linear referencing*. International Organization for Standardization.
URL http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=32566
(Último acceso en mayo de 2017)
- TechRadar** (2017). The 10 best GoPro and action cameras in 2017 | TechRadar.
URL <http://www.techradar.com>
(Último acceso en mayo de 2017)

Tecnocarreteras (2011). Sistema de gestión web de carreteras.

URL <https://www.tecnocarreteras.es/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Teixido, A. and Sala, E. (2016). Proceso de elaboración cartográfica para el Parque de Bomberos de Girona. In *SigLibre Girona 2016*.

Telenav (2016). OpenStreetCam.

URL <http://openstreetcam.org/map/>

(Último acceso en mayo de 2017)

The ApacheSoftware Foundation (2015). log4j.

URL <http://logging.apache.org/log4j/1.2/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Thepvilojanapong, N.; Sugo, K.; Namiki, Y. and Tobe, Y. (2011). Recognition of Bike-Riding States with HMM Analysis. *International Symposium on Computational Models for Life Sciences (CMLS-11)*, Toyama, Japan, vol. 1371 pp. 339–340. ISSN 0094-243X. doi:10.1063/1.3596658.

Tong, X.; Meng, X. and Ding, K. (2010). Estimating geometric parameters of highways and railways using least-squares adjustment. *Survey Review*, vol. 42 pp. 359–374.

Torvalds, L. (2005). GIT.

URL <https://git-scm.com/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Tsai, Y.J.; Wu, J.; Wang, Z. and Hu, Z. (2010). Horizontal Roadway Curvature Computation Algorithm Using Vision Technology. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 25(2) pp. 78–88. ISSN 10939687. doi:10.1111/j.1467-8667.2009.00622.x.

U.S. Department of Transportation (2010). *Model Inventory of Roadway Elements. MIRE, Version 1.0*. Federal Highway Administration.

VideoLAN (2017). VLC MediaPlayer.

URL <http://www.videolan.org/index.html>

(Último acceso en mayo de 2017)

Vladimir Gutiérrez, F.; Malinowski, E. and Rodríguez Alvarado, A. (2012). Lenguajes Geoespaciales. In *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)*, chap. 21, pp. 275–285. UPM Press. ISBN 978-84-939196-6-5.

Washington State Department of Transportation (2015). *School Walk and Bike Routes*.: Washington Traffic Safety Comission.

Wazar (2013). Geocam Free - Android Apps on Google Play.

URL <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.myway&hl=en>

(Último acceso en mayo de 2017)

Waze (2006). Aplicación gratuita de Tráfico y Navegación basada en Mapas de la Comunidad.

URL <https://www.waze.com/es/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Westra, E. (2016). *Python Geospatial Development, Third edition*. Packt Publishing.

World Wide Web Consortium (2013). Extensible Markup Language (XML).

URL <https://www.w3.org/XML/>

(Último acceso en mayo de 2017)

Youssef, A.; Maerz, N.H. and Xiang, Q. (2007). RockSee: Video image measurements of physical features to aid in highway rock cut characterization. *Computers and Geosciences*, vol. 33(3) pp. 437–444. ISSN 00983004. doi: 10.1016/j.cageo.2006.08.005.

Zaldívar, J.; Calafate, C.T.; Carlos Cano, J. and Manzoni, P. (2011). Providing Accident Detection in Vehicular Networks Through OBD-II Devices and Android-based Smartphones. *IEEE 36th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pp. 813–819. ISSN 0742-1303.

Anexos

A. DESCRIPCIÓN DE LAS OPCIONES DEL PROGRAMA ROADPLAYER

Cuando se ejecuta el programa *RoadPlayer* se muestra la pantalla principal de la aplicación que consta de los siguientes elementos (ver figura A.1):

Fig. A.1: Pantalla principal de la aplicación *RoadPlayer*

1. **Menú principal:** ofrece las opciones disponibles en el programa
2. **Botones de acceso rápido:** accesos rápidos a las principales opciones del menú
3. **Panel de vídeo:** muestra el vídeo durante la reproducción
4. **Controles de reproducción del vídeo:** permiten actuar sobre la reproducción del vídeo. Hay botones para *play*, *stop*, salto adelante, salto atrás, ir al principio del vídeo e ir al final
5. **Barra de mensajes:** va mostrando mensajes de estado e informativos durante la ejecución del programa
6. **Panel del mapa:** muestra la cartografía de fondo, la traza, la posición del móvil y las capas vectoriales *shapefile*: que se hayan añadido al mapa
7. **Controles del mapa:** permiten seleccionar el mapa de fondo, hacer zoom y desplazamiento, encuadre a todo el mapa, encuadre a la península ibérica, encuadre a la traza y activar la sincronización inversa. El mapa de fondo se puede elegir entre varias opciones de *Web Map Services* vía internet, que incluyen el mapa ráster y las ortofotografías del IGN
8. **Barra de información del mapa:** ofrece informaciones de estado de la

cartografía. Muestra un indicador de carga de los mapas, la proyección del mapa actual y las coordenadas del ratón cuando sobrevuela el mapa

9. **Perfil longitudinal:** muestra el perfil longitudinal de la traza y la posición del móvil en cada momento. El panel permite hacer zoom y desplazamiento. También es posible configurar, en el propio panel, los colores y gruesos de línea de los ejes y la traza. Por último, es posible guardar la imagen del perfil en distintos formatos de imagen
10. **Panel info:** muestra datos de la posición actual durante la reproducción, como las coordenadas geográficas, las coordenadas UTM, la altitud, el rumbo, la velocidad en m/s, la velocidad en Km/h, la precisión del dato, el tiempo transcurrido desde el inicio y la distancia al origen de la traza

El programa ofrece numerosas opciones pensadas para su utilización en tareas de inventariado de carreteras. Las opciones del programa están organizadas en los siguientes submenús:

- **Archivo:** ofrece opciones para abrir un archivo de video-traza y para salir del programa
- **Vídeo:** ofrece opciones para extraer fotogramas equiespaciados o fotogramas individuales
 - *Fotogramas equiespaciados:* Los programas de reproducción de vídeo suelen ofrecer la posibilidad de extraer fotogramas con un intervalo de tiempo determinado entre ellos. En este caso, se ofrece extraer fotogramas equiespaciados por distancia. Se puede seleccionar el tramo de la traza del cual se extraerán los fotogramas, así como la distancia en metros a lo largo de la traza entre cada dos fotogramas. Los fotogramas incorporan los metadatos de georreferenciación. Esta opción permite compartir la información de los vídeos con otros programas de inventarios de carreteras que utilizan fotografías individuales cada cierta distancia, en lugar de las filmaciones de vídeo.
 - *Fotogramas individuales:* en cualquier momento se puede detener la reproducción del vídeo y guardar en el disco el fotograma que esté en ese momento en la pantalla. Puede servir para añadir la fotografía a la ficha individual de los elementos del inventario. Los fotogramas incorporan los metadatos de georreferenciación. Además se graba en el disco, junto con cada fotograma extraído, un fichero en formato KML con la descripción del punto y del fotograma de forma que se pueda visualizar en *Google Earth*
- **Mapa:** ofrece varias opciones en relación a la gestión de la cartografía
 - *Añadir capas vectoriales:* se pueden añadir al mapa capas vectoriales en formato *shapefile* que completen la información del mapa base. Por

ejemplo, si se dispone de la capa con el eje de la carretera, se puede añadir al mapa y de esta manera comprobar la precisión de la traza registrada. Otro ejemplo podría ser, si se dispone de capas vectoriales con los elementos del inventario, añadirlas al mapa para ir comprobando en el vídeo su estado a medida que se alcanza su posición

- *Configurar las capas del mapa*: permite la configuración de las capas vectoriales y la de la traza, seleccionando color, grueso de línea, transparencia, visibilidad, etiquetas y otras opciones
 - *Exportar mapa*: se puede grabar en el disco una imagen en formato *jpg* de la visualización actual del mapa. Esta opción, en combinación con la de grabar fotogramas individuales, permite completar las fichas de los elementos individuales del inventario.
- *Track*: opciones e informes en relación con la traza GNSS que se está reproduciendo. Todos los informes gráficos se pueden visualizar en pantalla y ofrecen opciones para hacer zoom, desplazamiento, encuadres, personalización de ejes y líneas y para grabar la imagen del informe en diferentes formatos.
- *Informe del track*: ofrece un informe detallado del track, además de un mapa del mismo. Entre las informaciones se incluyen: fichero en el que está guardada la traza, con su nombre, tamaño, fecha y hora; longitud en metros y número de puntos de la traza; valores iniciales, finales, máximos y mínimos de las coordenadas (longitud, latitud y altitud); valor medio de la altitud; duración en minutos y segundos del recorrido; velocidades máxima, mínima y media del móvil durante el recorrido
 - *Perfil longitudinal de la traza*: el programa calcula el perfil longitudinal del recorrido. El informe muestra un gráfico del perfil longitudinal, además de algunas informaciones numéricas del mismo.
 - *Diagrama de pendientes*: el programa calcula el diagrama de pendientes y lo muestra en forma de gráfico. Además se ofrece información acerca de la longitud y de las pendientes máxima, mínima y media, tanto de la traza completa, como de los tramos ascendentes y descendentes (ver figura A.2).
 - *Diagrama de velocidades*: el programa calcula un diagrama de velocidades del vehículo a lo largo del recorrido. El informe muestra un gráfico del mismo, además de algunas informaciones numéricas acerca de la longitud de la traza, y los valores máximo, mínimo y medio de la velocidad
 - *Estilo de línea del track*: se puede elegir color, grueso de línea y transparencia de la línea de la traza que se muestra en el mapa

- *Estilo del marcador del móvil*: es posible seleccionar el tipo de marcador, el color de la línea y del relleno, el tamaño y la etiqueta del icono del móvil que se muestra en el mapa.
- *Exportar track*: la traza del recorrido se puede exportar en varios formatos, para poder utilizarla en programas de SIG u otros programas. La traza se puede exportar en formato *shapefile* como línea o como puntos individuales. También se puede exportar en formato *KML*, lo que permite su utilización en el programa *Google Earth*.
- *Ayuda*: se ofrecen en este menú ayuda e información del programa y una opción que sirve para configurar el *proxy*, para los casos en los que se trabaje en una red empresarial que lo requiera para los accesos a internet.

Fig. A.2: *RoadPlayer*: informe «Diagrama de pendientes»

El programa *RoadPlayer* está desarrollado en lenguaje JAVA, versión 1.6. El control de versiones se ha realizado mediante el software *GIT* (Torvalds, 2005). La compilación para los distintos sistemas operativos se gestiona con Maven, lo que facilita el trabajo de despliegue de versiones a posibles desarrolladores interesados en la modificación o ampliación del programa (Apache Foundation, 2008). El programa utiliza varias librerías de software libre para realizar algunas de sus funciones:

- *junit*: el programa se ha desarrollado siguiendo la metodología de *Test Driven Development*. La librería *junit* se utiliza para la creación de tests unitarios que permiten monitorizar todas las funciones del programa a medida que se avanza en su desarrollo (Gamma and Beck, 2014)

- *VLCJ*: Para gestionar, procesar y reproducir los vídeos, el programa utiliza el componente *VLC media player* (VideoLAN, 2017). La librería *VLCJ* es la que se utiliza para incorporar el componente VLC y utilizar sus funcionalidades desde el lenguaje JAVA (Caprica Software, 2016)
- *Geotools*: La gestión cartográfica, las reproyecciones entre los distintos sistemas de referencia, la visualización del mapa base y la de las capas vectoriales se realiza mediante la librería *Geotools*. *Geotools* es una librería mantenida por *OSGeo* (OSGEO, 2006), que permite la gestión de cartografía desde el lenguaje JAVA (Open Source Geospatial Foundation, 2002)
- *JFreeChart*: es una librería destinada a la realización de gráficos de funciones bajo entornos Java (Gilbert, 2000)
- *Apache commons*: se utilizan varias librerías de la Fundación Apache para gestión de gráficos y de entradas y salidas de ficheros (Apache Software Foundation, 2016)
- *opencsv*: es una librería que proporciona funciones para entrada y salida de ficheros en formato CSV (Miller et al., 2009)
- *log4j*: es una librería de la Fundación Apache Software que permite la salida de mensajes en la consola del programa durante la ejecución del mismo, informando de resultados parciales, incidencias y errores (The ApacheSoftware Foundation, 2015)

B. RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO DE INVENTARIOS DEL CAPÍTULO 4

B.1 INVENTARIO DE LA CARRETERA M-607

NOTA: SE LISTAN A CONTINUACIÓN ALGUNOS ELEMENTOS NODE, WAY Y RELATION CARACTERÍSTICOS DE ESTE CASO DE ESTUDIO. EL RESULTADO DEL INVENTARIO ES UNA CAPA VECTORIAL EN FORMATO OSM PARA SU UTILIZACIÓN CON PROGRAMAS SIG, QUE SE INCLUYE EN EL CD QUE ACOMPAÑA A ESTE DOCUMENTO Y SE PUEDE DESCARGAR DEL REPOSITORIO DE CÓDIGO HABILITADO PARA LA TESIS EN LA DIRECCIÓN:

<https://github.com/shiguera/tesishiguera>

```
<osm version="0.6">
<node id="2974" lat="40.685551" lon="-3.821740"/>
<relation>
  <tag k="type" v="PK"/>
  <tag k="Route" v="M-607"/>
  <tag k="PK" v="39"/>
  <tag k="señalización" v="Señalización Vertical"/>
  <tag k="ref:es" v="PK-1"/>
  <tag k="nombre" v="Punto Kilométrico"/>
  <tag k="grupo" v="Hitos"/>
  <tag k="sentido" v="ascendente"/>
  <tag k="situacion" v="derecha"/>
  <member type="node" id="2974" role=""/>
</relation>
<node id="1008" lat="40.68337867965" lon="-3.79469197669">
  <tag k="Route" v="M-607"/>
  <tag k="PK" v="39+240"/>
  <tag k="señalización" v="Señalización Vertical"/>
  <tag k="ref:es" v="P-1c"/>
  <tag k="nombre" v="Intersección con prioridad"/>
  <tag k="grupo" v="Advertencia de peligro"/>
  <tag k="sentido" v="ascendente"/>
  <tag k="situacion" v="derecha"/>
</node>
<node id="1010" lat="40.68537402203" lon="-3.8225027308">
```

```

<tag k="description" v="Crossroads with a minor road"/>
<tag k="group" v="warning"/>
<tag k="highway" v="traffic_signals"/>
<tag k="ref:es" v="P-1c"/>
</node>
<node id="2944" lat="40.69744106522" lon="-3.92170161988">
  <tag k="description" v="double curve"/>
  <tag k="group" v="warning"/>
  <tag k="highway" v="traffic_signals"/>
  <tag k="ref:es" v="P-14b"/>
</node>
<relation id="113421">
  <tag k="route" v="A-2"/>
  <member type="way" id="270186" role="1"/>
  <member type="way" id="4418767" role="2"/>
</relation>
<node id="3450987" lon="-3.4356725" lat="40.9878652">
  <tag k="route" v="A-2"/>
  <tag k="station" v="5+0230"/>
  <tag k="traffic-sign" v="es:P1"/>
</node>
<relation id="3450988">
  <tag k="route" v="A-2"/>
  <tag k="linearElement" v="guard-rail"/>
  <tag k="starting-station" v="5+0080"/>
  <tag k="ending-station" v="5+00170"/>
</relation>
<relation id="3450989">
  <tag k="route" v="A-2"/>
  <tag k="pavementState" v="good"/>
  <tag k="starting-station" v="5+0090"/>
  <tag k="ending-station" v="5+0190"/>
</relation>
<node id="-12" lat="40.68535975752" lon="-3.82372942436"/>
<node id="-14" lat="40.68535772359" lon="-3.82345583904"/>
.....
<node id="-2869" lat="40.68545912387" lon="-3.82213624903"/>
<node id="-2881" lat="40.68547072536" lon="-3.8220632829"/>
<node id="-2901" lat="40.68553408733" lon="-3.8217055135"/>
<node id="-2944" lat="40.69744106522" lon="-3.92170161988">
  <tag k="description" v="double curve"/>
  <tag k="group" v="warning"/>
  <tag k="highway" v="traffic_signals"/>
  <tag k="ref:spain" v="P-14b"/>
</node>
<node id="-2974" lat="40.688578" lon="-3.901829">
  <tag k="PK" v="42+00000"/>

```

```

<tag k="description" v="Kilometer 42"/>
<tag k="group" v="milestones"/>
<tag k="highway" v="traffic_signals"/>
<tag k="ref:spain" v="PK-1"/>
</node>
<way id="32486113">
  <nd ref="52713472"/>
  <nd ref="1095102381"/>
  <nd ref="831841871"/>
  .....
  <nd ref="52713395"/>
  <nd ref="365250013"/>
  <tag k="highway" v="trunk"/>
  <tag k="motorroad" v="no"/>
  <tag k="name" v="Carretera de Colmenar Viejo a Navacerrada"/>
  <tag k="ref" v="M-607"/>
  <tag k="source:name" v="local knowledge"/>
</way>
</osm>

```

Listado B.1: *Fichero de inventario de la M-607*

B.2 INVENTARIO DEL CAMINO FORESTAL DE MATARRUBIA

NOTA: SE LISTAN A CONTINUACIÓN ALGUNOS ELEMENTOS NODE, WAY Y RELATION CARACTERÍSTICOS DE ESTE CASO DE ESTUDIO. EL RESULTADO DEL INVENTARIO ES UNA CAPA VECTORIAL EN FORMATO OSM PARA SU UTILIZACIÓN CON PROGRAMAS SIG, QUE SE INCLUYE EN EL CD QUE ACOMPAÑA A ESTE DOCUMENTO Y SE PUEDE DESCARGAR DEL REPOSITORIO DE CÓDIGO HABILITADO PARA LA TESIS EN LA DIRECCIÓN:

<https://github.com/shiguera/tesishiguera>

```
<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<osm>
  <node id='-30470' lat='40.68251482101' lon='-3.85046969307'>
    <tag k='traffic_sign' v='ES:p1' />
  </node>
  <node id='-30472' lat='40.68957217505' lon='-3.98904116671'>
    <tag k='Capacidad' v='50 m3' />
    <tag k='DistOrigen' v='3904' />
    <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
    <tag k='Instalaciones' v='Depósito' />
  </node>
  <node id='-30474' lat='40.69080872366' lon='-3.98531732725'>
    <tag k='DistOrigen' v='2790' />
    <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
    <tag k='Instalaciones' v='Fuente' />
    <tag k='Nombre' v='Fuente del Pílon' />
  </node>
  <node id='-30476' lat='40.69087284577' lon='-3.9851866325'>
    <tag k='Capacidad' v='50 m3' />
    <tag k='DistOrigen' v='2790' />
    <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
    <tag k='Instalaciones' v='Depósito' />
  </node>
  <node id='-30478' lat='40.69364090048' lon='-3.97468133347'>
    <tag k='DistOrigen' v='1145' />
    <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
    <tag k='drenaje' v='acequia' />
  </node>
  <node id='-30480' lat='40.69406083137' lon='-3.9739806584'>
    <tag k='DistOrigen' v='1058' />
    <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
    <tag k='señalización' v='informacion' />
    <tag k='texto' v='Coto de caza' />
  </node>
</osm>
```

```

<node id='−30482' lat='40.68775172497' lon='−3.98010831275'>
  <tag k='Acopio' v='Material fungible' />
  <tag k='DistOrigen' v='2177' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
</node>
<node id='−30484' lat='40.69324351377' lon='−3.97660307887'>
  <tag k='DistOrigen' v='1348' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='construccion' v='Bebedero cinegético' />
</node>
<node id='−30486' lat='40.69583634886' lon='−3.97006840108'>
  <tag k='DistOrigen' v='670' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='drenaje' v='acequia' />
</node>
<node id='−30488' lat='40.69310330052' lon='−3.97613100601'>
  <tag k='Construccion' v='Torre alta tensión' />
  <tag k='DistOrigen' v='1286' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='Nota' v='Punto inicio linea enterrada' />
</node>
<node id='−30490' lat='40.68837744816' lon='−3.97959163458'>
  <tag k='Capacidad' v='50 m3' />
  <tag k='Construccion' v='Depósito de agua' />
  <tag k='DistOrigen' v='2080' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
</node>
<node id='−30492' lat='40.69338020379' lon='−3.97668299672'>
  <tag k='DistOrigen' v='1384' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='drenaje' v='acequia' />
</node>
<node id='−30494' lat='40.69409746951' lon='−3.97388773067'>
  <tag k='DistOrigen' v='1058' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='Limitacion Acceso' v='Barrera con llave' />
</node>
<node id='−30496' lat='40.69672972628' lon='−3.96436449717'>
  <tag k='DistOrigen' v='160' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='construccion' v='deposito' />
</node>
<node id='−30498' lat='40.69019257587' lon='−3.97970500641'>
  <tag k='DistOrigen' v='1851' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='drenaje' v='acequia' />
</node>

```

```

<node id='−30500' lat='40.69408337792' lon='−3.97394720442'>
  <tag k='DistOrigen' v='1058' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='señalizacion' v='informacion' />
  <tag k='texto' v='Prohibida la práctica del ciclismo fuera de las
    pistas forestales' />
</node>
<node id='−30502' lat='40.69402701153' lon='−3.97386171091'>
  <tag k='DistOrigen' v='1058' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='señalizacion' v='ES:r100' />
  <tag k='texto' v='Prohibido acceso a vehículos, excepto autorizados' />
</node>
<node id='−30504' lat='40.69332031387' lon='−3.97557715676'>
  <tag k='DistOrigen' v='1233' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='drenaje' v='acequia' />
</node>
<node id='−30506' lat='40.69644367771' lon='−3.96675831543'>
  <tag k='DistOrigen' v='371' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='drenaje' v='acequia' />
</node>
<node id='−30508' lat='40.68830416557' lon='−3.97971987485'>
  <tag k='DistOrigen' v='2080' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='señalizacion' v='ES:p15b' />
</node>
<node id='−30510' lat='40.69014607089' lon='−3.97987041777'>
  <tag k='Conduccion' v='Agua' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='DistOrigen' v='1851' />
  <tag k='Nota' v='Alimentación depósito Moralarzal' />
</node>
<node id='−30512' lat='40.6932103981' lon='−3.97660029104'>
  <tag k='DistOrigen' v='1348' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='construccion' v='Comedero cinegético' />
</node>
<node id='−30514' lat='40.69741297658' lon='−3.96265524155'>
  <tag k='DistOrigen' v='0' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='Limitacion Acceso' v='Paso Canadiense' />
</node>
<node id='−30516' lat='40.69748874973' lon='−3.96267061741' />
<node id='−30518' lat='40.69750040714' lon='−3.96286281557' />
.....

```



```

<node id='−30890' lat='40.68379353824' lon='−3.99461875747' />
<node id='−30892' lat='40.6885748' lon='−3.9918858'>
  <tag k='DistOrigen' v='5127' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='name' v='El Pinar' />
  <tag k='ngbe:hojabcn25' v='0508−4' />
  <tag k='ngbe:huso' v='30' />
  <tag k='ngbe:id' v='532401' />
  <tag k='ngbe:lat_ed50' v='−3.9905664573' />
  <tag k='ngbe:lon_ed50' v='40.6897486889' />
  <tag k='ngbe:xutm_ed50' v='416298' />
  <tag k='ngbe:yutm_ed50' v='4504867' />
  <tag k='source' v='Instituto Geográfico Nacional' />
</node>
<node id='−30894' lat='40.68953450478' lon='−3.98910232094'>
  <tag k='DistOrigen' v='3904' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='Instalaciones' v='Fuente' />
  <tag k='Nombre' v='Fuente del Pilón' />
</node>
<node id='−30896' lat='40.6910045123' lon='−3.99131714216'>
  <tag k='DistOrigen' v='3702' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='name' v='Prados del Pinar' />
  <tag k='ngbe:hojabcn25' v='0508−4' />
  <tag k='ngbe:huso' v='30' />
  <tag k='ngbe:id' v='532472' />
  <tag k='ngbe:lat_ed50' v='−3.9899289153' />
  <tag k='ngbe:lon_ed50' v='40.6922494452' />
  <tag k='ngbe:xutm_ed50' v='416355' />
  <tag k='ngbe:yutm_ed50' v='4505144' />
  <tag k='source' v='Instituto Geográfico Nacional' />
</node>
<node id='−30900' lat='40.6918352' lon='−3.9903057'>
  <tag k='DistOrigen' v='3637' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='Instalaciones' v='Abrevadero' />
</node>
<node id='−30902' lat='40.6899291' lon='−3.9847084'>
  <tag k='DistOrigen' v='2666' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='Instalaciones' v='Abrevadero' />
</node>
<node id='−30904' lat='40.69672972628' lon='−3.96436449717'>
  <tag k='construccion' v='deposito' />
</node>
<node id='−30906' lat='40.69680863601' lon='−3.96902389342'>

```

```

<tag k='construccion' v='molino' />
</node>
<way id='-30908'>
  <nd ref='-30516' />
  .....
  <nd ref='-30570' />
  <nd ref='-30572' />
  <tag k='Firme' v='Granular' />
  <tag k='Vehiculos' v='TodoTerreno' />
  <tag k='Via' v='Camino Forestal' />
  <tag k='ancho' v='3.5' />
</way>
<way id='-30910' action='modify' visible='true'>
  <nd ref='-30574' />
  <nd ref='-30576' />
  .....
  <nd ref='-30888' />
  <nd ref='-30890' />
  <tag k='Nombre' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='Firme' v='Granular' />
  <tag k='via' v='Camino Forestal' />
</way>
<relation>
  <tag k='contencion' v='barrera' />
  <tag k='DistOrigen' v='0' />
  <tag k='Route' v='Camino de Matarrubia' />
</relation>
<relation id='-30914'>
  <member type='way' ref='-30910' role='2' />
  <member type='way' ref='-30908' role='1' />
  <tag k='Nombre' v='Camino de Matarrubia' />
  <tag k='Tipo' v='Route' />
</relation>
</osm>

```

Listado B.2: *Fichero de inventario del Camino Forestal del Monte de Matarrubia*

B.3 INVENTARIO DE VÍA CICLISTA EN CAMBRIDGESHIRE

NOTA: SE LISTAN A CONTINUACIÓN ALGUNOS ELEMENTOS NODE, WAY Y RELATION CARACTERÍSTICOS DE ESTE CASO DE ESTUDIO. EL RESULTADO DEL INVENTARIO ES UNA CAPA VECTORIAL EN FORMATO OSM PARA SU UTILIZACIÓN CON PROGRAMAS SIG, QUE SE INCLUYE EN EL CD QUE ACOMPAÑA A ESTE DOCUMENTO Y SE PUEDE DESCARGAR DEL REPOSITORIO DE CÓDIGO HABILITADO PARA LA TESIS EN LA DIRECCIÓN:

<https://github.com/shiguera/tesishiguera>

```
<osm version="0.6">
<node id="5276424" lat="52.1556411" lon="-0.1949605"/>
<node id="41035418" lat="52.0873619" lon="0.1682969">
  <tag k="crossing" v="manual_gates"/>
  <tag k="crossing:automatic" v="no"/>
  <tag k="crossing:gated" v="yes"/>
  <tag k="crossing:lights" v="no"/>
  <tag k="description" v="Infrequently used, but exists none-the-less"/>
  <tag k="railway" v="level_crossing"/>
  <tag k="source" v="local_knowledge"/>
</node>
<node id="2187759143" lat="52.0866794" lon="0.1721149">
  <tag k="crossing:barrier" v="half"/>
  <tag k="crossing:bell" v="yes"/>
  <tag k="crossing:light" v="yes"/>
  <tag k="railway" v="level_crossing"/>
</node>
...
<node id="4435836983" lat="52.0653797" lon="0.1752390"/>
<way id="4237710">
  <nd ref="25301257"/>
  ...
  <nd ref="40810344"/>
  <tag k="highway" v="tertiary"/>
  <tag k="maxspeed" v="30 mph"/>
  <tag k="name" v="Duxford Road"/>
</way>
....
<way id="245519906">
  <nd ref="192625364"/>
  ...
  <nd ref="275939946"/>
  <tag k="access" v="yes"/>
  <tag k="bicycle" v="permissive"/>
```

```

<tag k="foot" v="designated" />
<tag k="highway" v="service" />
<tag k="service" v="driveway" />
<tag k="source" v="survey:gps" />
<tag k="source_ref" v="gps" />
</way>
<way id="254698948">
  <nd ref="1647445287" />
  ...
  <nd ref="81557728" />
  <tag k="highway" v="unclassified" />
  <tag k="maxspeed" v="60 mph" />
  <tag k="ncn_ref" v="11" />
  <tag k="source" v="GPS" />
</way>
<way id="306851580">
  <nd ref="269188139" />
  ...
  <nd ref="32041915" />
  <tag k="highway" v="tertiary" />
  <tag k="maxspeed" v="30 mph" />
  <tag k="name" v="High Street" />
</way>
<relation id="935883">
  <member type="way" ref="5015779" role="" />
  ...
  <member type="way" ref="4801560" role="" />
  <tag k="description" v="National Byway route through Cambridgeshire" />
  <tag k="name" v="National Byway (Cambridgeshire)" />
  <tag k="name:es" v="Vía ciclista Cambridgeshire" />
  <tag k="network" v="rcn" />
  <tag k="ref" v="NB" />
  <tag k="route" v="bicycle" />
  <tag k="type" v="route" />
</relation>
</osm>

```

Listado B.3: *Fichero de inventario de la vía ciclista de Cambridgeshire*

B.4 INVENTARIO DE VÍA CICLISTA DE SHUTHERLAND A TAREN POINT

NOTA: SE LISTAN A CONTINUACIÓN ALGUNOS ELEMENTOS NODE, WAY Y RELATION CARACTERÍSTICOS DE ESTE CASO DE ESTUDIO. EL RESULTADO DEL INVENTARIO ES UNA CAPA VECTORIAL EN FORMATO OSM PARA SU UTILIZACIÓN CON PROGRAMAS SIG, QUE SE INCLUYE EN EL CD QUE ACOMPAÑA A ESTE DOCUMENTO Y SE PUEDE DESCARGAR DEL REPOSITORIO DE CÓDIGO HABILITADO PARA LA TESIS EN LA DIRECCIÓN:

<https://github.com/shiguera/tesishiguera>

```
<osm version="0.6">
<node id="17923253" lat="-34.0110606" lon="151.1258637"/>
<node id="657856084" lat="-34.0270556" lon="151.0840412">
  <tag k="barrier" v="bollard"/>
</node>
<node id="1291478706" lat="-34.0239087" lon="151.1107361">
  <tag k="source" v="nearmap"/>
  <tag k="traffic_calming" v="hump"/>
</node>
<node id="1412715663" lat="-34.0277224" lon="151.0680081">
  <tag k="crossing" v="zebra"/>
  <tag k="highway" v="crossing"/>
</node>
<node id="1897602637" lat="-34.0224091" lon="151.1079177">
  <tag k="traffic_calming" v="hump"/>
</node>
...
<node id="4111355433" lat="-34.0293675" lon="151.0802532"/>
<way id="4548124">
  <nd ref="657856601"/>
  <nd ref="1291480495"/>
  <tag k="highway" v="residential"/>
  <tag k="name" v="Bellingara Road"/>
</way>
...
<way id="365837006">
  <nd ref="3698413710"/>
  <nd ref="657812242"/>
  <nd ref="1612647572"/>
  <tag k="highway" v="tertiary"/>
  <tag k="lanes" v="3"/>
  <tag k="lanes:backward" v="1"/>
  <tag k="lanes:forward" v="2"/>
```

```
<tag k="name" v="Box Road" />
</way>
<relation id="420839">
  <member type="way" ref="51481323" role="" />
  ...
  <member type="way" ref="339125376" role="" />
  <tag k="name" v="Sutherland to Taren Point" />
  <tag k="network" v="lcn" />
  <tag k="route" v="bicycle" />
  <tag k="type" v="route" />
</relation>
</osm>
```

Listado B.4: *Fichero de inventario de la vía ciclista de Shutherland a Tarent Point (Australia)*

B.5 INVENTARIO DE LA LÍNEA DE AUTOBÚS NÚMERO 66 EN ASHDOD

NOTA: SE LISTAN A CONTINUACIÓN ALGUNOS ELEMENTOS NODE, WAY Y RELATION CARACTERÍSTICOS DE ESTE CASO DE ESTUDIO. EL RESULTADO DEL INVENTARIO ES UNA CAPA VECTORIAL EN FORMATO OSM PARA SU UTILIZACIÓN CON PROGRAMAS SIG, QUE SE INCLUYE EN EL CD QUE ACOMPAÑA A ESTE DOCUMENTO Y SE PUEDE DESCARGAR DEL REPOSITORIO DE CÓDIGO HABILITADO PARA LA TESIS EN LA DIRECCIÓN:

<https://github.com/shiguera/tesishiguera>

```
<osm>
<node id="302774795" lat="31.7866549" lon="34.6464231">
  <tag k="highway" v="traffic_signals"/>
</node>
<node id="302774796" lat="31.7895167" lon="34.6404601">
  <tag k="highway" v="traffic_signals"/>
</node>
<node id="1803037156" lat="31.7980670" lon="34.6328190">
  <tag k="gtfs:id" v="26142"/>
  <tag k="highway" v="bus_stop"/>
  <tag k="ref" v="13132"/>
  <tag k="source" v="israel_gtfs_v1"/>
</node>
...
<node id="1803093664" lat="31.7747200" lon="34.6660970">
  <tag k="bench" v="yes"/>
  <tag k="gtfs:id" v="25575"/>
  <tag k="highway" v="bus_stop"/>
  <tag k="ref" v="11038"/>
  <tag k="shelter" v="yes"/>
  <tag k="source" v="israel_gtfs_v1"/>
</node>
<node id="4392436082" lat="31.7896348" lon="34.6402138">
  <tag k="crossing" v="island"/>
  <tag k="crossing_ref" v="zebra"/>
  <tag k="highway" v="crossing"/>
</node>
<way id="27575944">
  <nd ref="302775162"/>
  ...
  <nd ref="302775162"/>
  <tag k="highway" v="secondary"/>
  <tag k="junction" v="roundabout"/>
```

```

</way>
...
<way id="441768386">
  <nd ref="1788369300"/>
  <nd ref="4392436077"/>
  <nd ref="1788343668"/>
  <tag k="highway" v="secondary"/>
  <tag k="name:en" v="Menahem Begin Avenue"/>
  <tag k="name:en1" v="Sderot Menahem Begin"/>
  <tag k="name:en2" v="Menahem Begin"/>
  <tag k="name:en3" v="Menahem Begin Blvd."/>
  <tag k="name:en4" v="Sderot Menachem Begin"/>
  <tag k="name:en5" v="Begin Avenue"/>
  <tag k="oneway" v="yes"/>
</way>
<relation id="3355624">
  <member type="node" ref="1803093664" role="stop"/>
  <member type="way" ref="193987057" role="backward"/>
  ...
  <member type="way" ref="357227477" role=""/>
  <tag k="name" v="Ashdod Bus Route 66"/>
  <tag k="network" v="High-Frequency Buses"/>
  <tag k="ref" v="66"/>
  <tag k="route" v="bus"/>
  <tag k="type" v="route"/>
</relation>
</osm>

```

Listado B.5: Fichero de inventario de la línea de autobús número 66 en Ashdod (Israel)

B.6 INVENTARIO DE UN TRAMO DEL CAMINO DE SANTIAGO

NOTA: SE LISTAN A CONTINUACIÓN ALGUNOS ELEMENTOS NODE, WAY Y RELATION CARACTERÍSTICOS DE ESTE CASO DE ESTUDIO. EL RESULTADO DEL INVENTARIO ES UNA CAPA VECTORIAL EN FORMATO OSM PARA SU UTILIZACIÓN CON PROGRAMAS SIG, QUE SE INCLUYE EN EL CD QUE ACOMPAÑA A ESTE DOCUMENTO Y SE PUEDE DESCARGAR DEL REPOSITORIO DE CÓDIGO HABILITADO PARA LA TESIS EN LA DIRECCIÓN:

<https://github.com/shiguera/tesishiguera>

```
<osm>
<node id="91188689" lat="43.4129292" lon="-8.1683418"/>
<node id="764905506" lat="42.9010925" lon="-8.5333109">
  <tag k="information" v="guidepost"/>
  <tag k="name" v="km 2,779"/>
  <tag k="tourism" v="information"/>
</node>
<node id="764912096" lat="42.8830047" lon="-8.5421734">
  <tag k="barrier" v="bollard"/>
  <tag k="bicycle" v="yes"/>
  <tag k="foot" v="yes"/>
  <tag k="horse" v="yes"/>
</node>
<node id="1997560112" lat="42.8878265" lon="-8.5378579">
  <tag k="addr:city" v="Santiago de Compostela"/>
  <tag k="addr:housenumber" v="103A"/>
  <tag k="addr:street" v="Rúa de Pastoriza"/>
  <tag k="bus" v="yes"/>
  <tag k="highway" v="bus_stop"/>
  <tag k="name" v="Pastoriza 103A"/>
  <tag k="network" v="ES:C:Tussa"/>
  <tag k="operator" v="Tussa"/>
  <tag k="ref" v="366"/>
</node>
...
<node id="265097305" lat="43.3278925" lon="-8.3823232">
  <tag k="crossing" v="uncontrolled"/>
  <tag k="highway" v="crossing"/>
</node>
<node id="4494988270" lat="43.3929527" lon="-8.1827443"/>
<way id="74466975">
  <nd ref="880249501"/>
  <nd ref="880249501"/>
  <tag k="amenity" v="place_of_worship"/>
```

```

<tag k="building" v="church"/>
<tag k="denomination" v="roman_catholic"/>
<tag k="name" v="Igrexa de Santiago"/>
<tag k="religion" v="christian"/>
</way>
<way id="11841788">
  <nd ref="106145592"/>
  ...
  <nd ref="106145607"/>
  <tag k="bicycle" v="yes"/>
  <tag k="highway" v="trunk"/>
  <tag k="name" v="Avenida de Saavedra Meneses"/>
  <tag k="nat_ref" v="N-651"/>
  <tag k="oneway" v="no"/>
  <tag k="ref" v="N-651"/>
</way>
...
<way id="439122121">
  <nd ref="2446551796"/>
  <nd ref="145964857"/>
  <tag k="highway" v="trunk"/>
  <tag k="is_in:city" v="Sigüeiro"/>
  <tag k="lanes" v="2"/>
  <tag k="maxspeed" v="50"/>
  <tag k="name" v="Avenida Compostela"/>
  <tag k="nat_ref" v="N-550"/>
  <tag k="oneway" v="no"/>
  <tag k="ref" v="N-550"/>
  <tag k="surface" v="asphalt"/>
</way>
<relation id="1102966">
  <member type="way" ref="24976006" role=""/>
  ...
  <member type="way" ref="406847914" role=""/>
  <tag k="denomination" v="catholic"/>
  <tag k="description" v="A Coruña/Ferrol – Bruma – Santiago"/>
  <tag k="distance" v="120 km"/>
  <tag k="name" v="Camino Inglés"/>
  <tag k="pilgrimage" v="yes"/>
  <tag k="religion" v="christian"/>
  <tag k="route" v="hiking"/>
  <tag k="type" v="route"/>
  <tag k="website" v="http://www.xacobeo.es; http://www.caminoingles.com"/>
</relation>
</osm>

```

Listado B.6: Fichero de inventario de un tramo del Camino de Santiago (España)

C. RESULTADOS DE LA RECONSTRUCCIÓN DE PERFILES LONGITUDINALES

C.1 M-607: ESTADO DE ALINEACIONES DE PROYECTO

M-607 Estado de alineaciones del proyecto entre PK 36 y PK 48

SE	ZE	PE	L	K
27072,000000	917,599997	-0,028084	0,534000	- GRADE
27072,534000	917,585000	-0,028084	52,932000	-7000,0 VERTICAL CURVE
27125,466000	915,898000	-0,035634	57,922000	- GRADE
27183,388000	913,834000	-0,035645	153,224000	5000,0 VERTICAL CURVE
27336,612000	910,720000	-0,005002	209,528000	- GRADE
27546,140000	909,672000	-0,005000	307,720000	-6000,0 VERTICAL CURVE
27853,860000	900,243000	-0,056289	98,207000	- GRADE
27952,067000	894,715000	-0,056287	191,866000	3000,0 VERTICAL CURVE
28143,933000	890,051000	0,007667	138,249000	- GRADE
28282,182000	891,111000	0,007669	179,636000	-7000,0 VERTICAL CURVE
28461,818000	890,184000	-0,017825	1,683000	- GRADE
28463,501000	890,154000	-0,017993	134,998000	10000,0 VERTICAL CURVE
28598,499000	888,636000	-0,004494	181,115000	- GRADE
28779,614000	887,822000	-0,004494	126,772000	8000,0 VERTICAL CURVE
28906,386000	888,257000	0,011348	168,218000	- GRADE
29074,604000	890,166000	0,011353	216,792000	-5000,0 VERTICAL CURVE
29291,396000	887,928000	-0,032006	417,486000	- GRADE
29708,882000	874,566000	-0,032006	125,976000	-4500,0 VERTICAL CURVE
29834,858000	868,771000	-0,060003	68,730000	- GRADE
29903,588000	864,647000	-0,060000	511,088000	5000,0 VERTICAL CURVE
30414,676000	860,102000	0,042220	113,239000	- GRADE
30527,915000	864,883000	0,042217	202,544000	-10000,0 VERTICAL CURVE
30730,459000	871,383000	0,021962	663,336000	- GRADE
31393,795000	885,951000	0,021963	184,410000	-5000,0 VERTICAL CURVE
31578,205000	886,601000	-0,014918	110,808000	- GRADE
31689,013000	884,948000	-0,014919	189,974000	10000,0 VERTICAL CURVE
31878,987000	883,918000	0,004075	198,274000	- GRADE
32077,261000	884,726000	0,004078	179,478000	5000,0 VERTICAL CURVE
32256,739000	888,680000	0,039972	17,237000	- GRADE
32273,976000	889,369000	0,039974	376,048000	-5600,0 VERTICAL CURVE
32650,024000	891,775000	-0,027181	181,045000	- GRADE
32831,069000	886,854000	-0,027178	161,862000	4000,0 VERTICAL CURVE
32992,931000	885,730000	0,013287	179,125000	- GRADE
33172,056000	888,110000	0,013288	131,888000	-8000,0 VERTICAL CURVE
33303,944000	888,776000	-0,003199	65,328000	- GRADE
33369,272000	888,567000	-0,003198	199,456000	9000,0 VERTICAL CURVE
33568,728000	890,139000	0,018971	20,136000	- GRADE
33588,864000	890,521000	0,018964	174,790000	-7000,0 VERTICAL CURVE
33763,654000	891,653000	-0,006003	68,471000	- GRADE
33832,125000	891,242000	-0,006006	121,750000	6200,0 VERTICAL CURVE
33953,875000	891,706000	0,013632	470,369000	- GRADE
34424,244000	898,118000	0,013631	131,512000	-15000,0 VERTICAL CURVE
34555,756000	899,334000	0,004863	492,074000	- GRADE
35047,830000	901,727000	0,004863	178,340000	4500,0 VERTICAL CURVE
35226,170000	906,128000	0,044495	477,044000	- GRADE
35703,214000	927,354000	0,044494	200,572000	-5700,0 VERTICAL CURVE
35903,786000	932,749000	0,009309	243,634000	- GRADE
36147,420000	935,017000	0,009306	223,160000	-7500,0 VERTICAL CURVE
36370,580000	933,774000	-0,020457	40,670000	- GRADE
36411,250000	932,942000	-0,020448	203,500000	9000,0 VERTICAL CURVE
36614,750000	931,081000	0,002164	509,741000	- GRADE
37124,491000	932,184000	0,002163	121,018000	8000,0 VERTICAL CURVE
37245,509000	933,361000	0,017289	368,722000	- GRADE

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

37614,231000	939,736000	0,017290	126,538000	-12000,0 VERTICAL CURVE
37740,769000	941,257000	0,006744	202,104000	- GRADE
37942,873000	942,620000	0,006745	146,254000	7000,0 VERTICAL CURVE
38089,127000	945,134000	0,027637	79,676000	- GRADE
38168,803000	947,336000	0,027638	230,394000	-5000,0 VERTICAL CURVE
38399,197000	948,396000	-0,018440	305,420000	- GRADE
38704,617000	942,764000	-0,018440	222,766000	-10000,0 VERTICAL CURVE
38927,383000	936,175000	-0,040726	80,759000	- GRADE
39008,142000	932,886000	-0,040717	133,716000	3500,0 VERTICAL CURVE
39141,858000	929,996000	-0,002501	31,985000	- GRADE
39173,843000	929,916000	-0,002512	76,314000	5000,0 VERTICAL CURVE
39250,157000	930,307000	0,012749	351,401000	- GRADE
39601,558000	934,787000	0,012751	134,884000	10000,0 VERTICAL CURVE

 SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.2 RECONSTRUCCIÓN M-607: DATOS DE PROYECTO

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 - Perfil de proyecto

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 12665
 Longitud (m) : 12663.91
 Separación media (m) : 1.0
 Altitud máxima (m) : 949.25
 Altitud media (m) : 904.64
 Altitud mínima (m) : 855.65
 Pendiente media : 0.0016

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 6.5E-5
 Kv límite : 15385
 Rectas Interpolación (Puntos) : 4
 Rectas Interpolación (m) : 3.0

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.001454
 Valor absoluto del Error (varianza) : 0.000373
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.019316
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.032879
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 0.09042

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 65
 Grades : 32
 Vertical curves : 33
 Cuasi grades : 0
 Short alignments (L<50.00 m) : 5
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
27072,534000	917,571897	-0,028007	53,000000	-6958,2	VERTICAL CURVE
27125,534000	915,885674	-0,035624	59,000000	-	GRADE
27184,534000	913,783860	-0,035624	152,000000	4964,1	VERTICAL CURVE
27336,534000	910,696147	-0,005004	210,000000	-	GRADE
27546,534000	909,645344	-0,005004	307,000000	-5997,9	VERTICAL CURVE
27853,534000	900,252343	-0,056188	99,000000	-	GRADE
27952,534000	894,689695	-0,056188	192,000000	3008,2	VERTICAL CURVE
28144,534000	890,028769	0,007637	138,000000	-	GRADE
28282,534000	891,082681	0,007637	178,000000	-7027,6	VERTICAL CURVE
28460,534000	890,187825	-0,017692	5,000000	-	GRADE
28465,534000	890,099366	-0,017692	134,000000	10173,7	VERTICAL CURVE
28599,534000	888,611159	-0,004520	181,000000	-	GRADE
28780,534000	887,792958	-0,004520	126,000000	7934,4	VERTICAL CURVE
28906,534000	888,223842	0,011360	169,000000	-	GRADE
29075,534000	890,143658	0,011360	217,000000	-4998,9	VERTICAL CURVE
29292,534000	887,898779	-0,032050	417,000000	-	GRADE
29709,534000	874,533931	-0,032050	125,000000	-4487,2	VERTICAL CURVE

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

29834,534000	868,786607	-0,059907	70,000000	-	GRADE
29904,534000	864,593104	-0,059907	510,000000	4998,4	VERTICAL CURVE
30414,534000	860,058603	0,042125	114,000000	-	GRADE
30528,534000	864,860833	0,042125	203,000000	-10069,7	VERTICAL CURVE
30731,534000	871,365990	0,021965	663,000000	-	GRADE
31394,534000	885,929041	0,021965	185,000000	-5002,8	VERTICAL CURVE
31579,534000	886,572049	-0,015014	110,000000	-	GRADE
31689,534000	884,920513	-0,015014	189,000000	9900,7	VERTICAL CURVE
31878,534000	883,886843	0,004076	199,000000	-	GRADE
32077,534000	884,697899	0,004076	179,000000	5006,7	VERTICAL CURVE
32256,534000	888,627230	0,039827	18,000000	-	GRADE
32274,534000	889,344124	0,039827	376,000000	-5617,1	VERTICAL CURVE
32650,534000	891,734851	-0,027111	181,000000	-	GRADE
32831,534000	886,827785	-0,027111	162,000000	4011,6	VERTICAL CURVE
32993,534000	885,706836	0,013272	179,000000	-	GRADE
33172,534000	888,082520	0,013272	131,000000	-7988,1	VERTICAL CURVE
33303,534000	888,746991	-0,003127	66,000000	-	GRADE
33369,534000	888,540583	-0,003127	199,000000	9067,8	VERTICAL CURVE
33568,534000	890,101840	0,018818	21,000000	-	GRADE
33589,534000	890,497027	0,018818	175,000000	-7059,9	VERTICAL CURVE
33764,534000	891,621302	-0,005970	68,000000	-	GRADE
33832,534000	891,215372	-0,005970	123,000000	6270,3	VERTICAL CURVE
33955,534000	891,687527	0,013647	470,000000	-	GRADE
34425,534000	898,101559	0,013647	130,000000	-14795,9	VERTICAL CURVE
34555,534000	899,304547	0,004861	493,000000	-	GRADE
35048,534000	901,700840	0,004861	179,000000	4512,1	VERTICAL CURVE
35227,534000	906,121495	0,044532	476,000000	-	GRADE
35703,534000	927,318806	0,044532	201,000000	-5703,8	VERTICAL CURVE
35904,534000	932,728174	0,009292	243,000000	-	GRADE
36147,534000	934,986226	0,009292	223,000000	-7523,5	VERTICAL CURVE
36370,534000	933,753514	-0,020348	41,000000	-	GRADE
36411,534000	932,919242	-0,020348	203,000000	9031,4	VERTICAL CURVE
36614,534000	931,070009	0,002129	510,000000	-	GRADE
37124,534000	932,155831	0,002129	122,000000	8044,2	VERTICAL CURVE
37246,534000	933,340720	0,017295	368,000000	-	GRADE
37614,534000	939,705412	0,017295	126,000000	-11962,9	VERTICAL CURVE
37740,534000	941,221075	0,006763	203,000000	-	GRADE
37943,534000	942,593921	0,006763	145,000000	6971,0	VERTICAL CURVE
38088,534000	945,082557	0,027563	81,000000	-	GRADE
38169,534000	947,315177	0,027563	231,000000	-5017,3	VERTICAL CURVE
38400,534000	948,364624	-0,018477	305,000000	-	GRADE
38705,534000	942,729109	-0,018477	223,000000	-10007,3	VERTICAL CURVE
38928,534000	936,124090	-0,040761	80,000000	-	GRADE
39008,534000	932,863230	-0,040761	133,000000	3490,4	VERTICAL CURVE
39141,534000	929,976012	-0,002656	33,000000	-	GRADE
39174,534000	929,888362	-0,002656	76,000000	4928,2	VERTICAL CURVE
39250,534000	930,272513	0,012765	351,000000	-	GRADE
39601,534000	934,753139	0,012765	134,908000	10099,6	VERTICAL CURVE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.3 RECONSTRUCCIÓN M-607: PENDIENTES, TRAMO 50 KM

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 PK 8+630 al 58+380 (Madrid) - Pendientes MFOM

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 4958
 Longitud (m) : 49501.49
 Separación media (m) : 9.99
 Altitud máxima (m) : 1259.35
 Altitud media (m) : 876.5
 Altitud mínima (m) : 745.87
 Pendiente media : 0.0102

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 4.5E-5
 Kv límite : 22222
 Rectas Interpolación (Puntos) : 3
 Rectas Interpolación (m) : 19.97

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.203576
 Valor absoluto del Error (varianza) : 0.093694
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.306096
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.331546
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 2.029847

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 360
 Grades : 131
 Vertical curves : 228
 Cuasi grades : 1
 Short alignments (L<50.00 m) : 30
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	757,000000	-0,037722	29,993346	-	GRADE
29,993346	755,868603	-0,037278	79,301426	2356,6	VERTICAL CURVE
109,294772	754,246668	-0,003627	220,069962	7329,9	VERTICAL CURVE
329,364734	756,752068	0,026396	309,427854	-	GRADE
638,792588	764,919820	0,026396	310,235642	-5230,4	VERTICAL CURVE
949,028230	763,908197	-0,032918	89,513039	-6073,5	VERTICAL CURVE
1038,541270	760,301975	-0,047656	189,567005	-	GRADE
1228,108274	751,267915	-0,047656	99,709858	6369,3	VERTICAL CURVE
1327,818132	747,296580	-0,032002	90,163075	3355,3	VERTICAL CURVE
1417,981207	745,622635	-0,005130	109,946573	3711,6	VERTICAL CURVE
1527,927780	746,687071	0,024493	70,199502	6905,1	VERTICAL CURVE
1598,127282	748,763285	0,034659	59,551214	-	GRADE
1657,678497	750,827274	0,034659	119,645498	-7691,7	VERTICAL CURVE
1777,323994	754,043521	0,019104	130,203562	-4939,7	VERTICAL CURVE
1907,527557	754,814917	-0,007255	69,698485	-8922,3	VERTICAL CURVE
1977,226042	754,037035	-0,015067	330,158207	-	GRADE
2307,384249	749,062694	-0,015067	169,374720	8485,0	VERTICAL CURVE

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

2476,758969	748,201306	0,004895	110,050483	7049,8	VERTICAL CURVE
2586,809452	749,598985	0,020506	159,895744	7128,5	VERTICAL CURVE
2746,705195	754,671017	0,042936	129,439469	-	GRADE
2876,144664	760,228653	0,042936	49,980246	-13177,6	VERTICAL CURVE
2926,124910	762,279832	0,039143	80,275876	-5560,2	VERTICAL CURVE
3006,400787	764,842603	0,024706	70,230881	-4819,3	VERTICAL CURVE
3076,631668	766,065974	0,010133	99,188834	-6408,6	VERTICAL CURVE
3175,820502	766,303443	-0,005345	170,459902	-	GRADE
3346,280404	765,392409	-0,005345	89,448566	9417,6	VERTICAL CURVE
3435,728970	765,339139	0,004153	120,069615	3929,7	VERTICAL CURVE
3555,798584	767,672162	0,034708	79,484464	-	GRADE
3635,283048	770,430883	0,034708	149,904983	-4435,6	VERTICAL CURVE
3785,188031	773,100626	0,000911	70,169729	-3325,3	VERTICAL CURVE
3855,357760	772,424223	-0,020191	59,818909	-	GRADE
3915,176669	771,216448	-0,020191	129,865001	14535,3	VERTICAL CURVE
4045,041670	769,174540	-0,011256	40,000000	-	GRADE
4085,041670	768,724296	-0,011256	59,749253	11245,6	VERTICAL CURVE
4144,790924	768,210481	-0,005943	69,884781	7132,1	VERTICAL CURVE
4214,675704	768,137543	0,003856	49,341112	-	GRADE
4264,016816	768,327783	0,003856	260,171259	-8813,1	VERTICAL CURVE
4524,188075	765,490630	-0,025665	59,983069	-	GRADE
4584,171144	763,951135	-0,025665	80,354126	8227,6	VERTICAL CURVE
4664,525269	762,281191	-0,015899	89,331402	3184,8	VERTICAL CURVE
4753,856672	762,113750	0,012150	69,938840	6231,2	VERTICAL CURVE
4823,795512	763,356026	0,023374	119,481602	-	GRADE
4943,277114	766,148824	0,023374	30,125179	5649,8	VERTICAL CURVE
4973,402292	766,933293	0,028706	60,694275	-	GRADE
5034,096567	768,675606	0,028706	169,251035	-6433,3	VERTICAL CURVE
5203,347602	771,307821	0,002398	60,467603	-2706,6	VERTICAL CURVE
5263,815206	770,777359	-0,019943	229,092063	-	GRADE
5492,907268	766,208521	-0,019943	159,913817	3728,6	VERTICAL CURVE
5652,821085	766,448505	0,022945	209,697381	-	GRADE
5862,518467	771,259939	0,022945	139,811700	-4639,1	VERTICAL CURVE
6002,330167	772,361078	-0,007193	69,501452	-	GRADE
6071,831619	771,861160	-0,007193	110,120423	4849,2	VERTICAL CURVE
6181,952042	772,319429	0,015516	130,048507	-	GRADE
6312,000549	774,337258	0,015516	109,994769	-4108,7	VERTICAL CURVE
6421,995318	774,571601	-0,011255	149,694259	-	GRADE
6571,689577	772,886795	-0,011255	39,854279	10425,2	VERTICAL CURVE
6611,543856	772,514415	-0,007432	89,460593	4845,5	VERTICAL CURVE
6701,004449	772,675382	0,011031	119,598615	5251,7	VERTICAL CURVE
6820,603064	775,356472	0,033804	80,501205	-	GRADE
6901,104269	778,077741	0,033804	169,419506	-4256,7	VERTICAL CURVE
7070,523775	780,433345	-0,005996	40,295630	-	GRADE
7110,819405	780,191727	-0,005996	79,913817	7016,7	VERTICAL CURVE
7190,733222	780,167626	0,005393	179,524590	-	GRADE
7370,257812	781,135793	0,005393	100,516034	10865,5	VERTICAL CURVE
7470,773847	782,142805	0,014644	758,142720	-	GRADE
8228,916567	793,244963	0,014644	60,803490	-3614,3	VERTICAL CURVE
8289,720056	793,623914	-0,002179	99,044249	-6126,7	VERTICAL CURVE
8388,764305	792,607514	-0,018345	39,854279	-	GRADE
8428,618584	791,876385	-0,018345	90,712539	8899,3	VERTICAL CURVE
8519,331124	790,674586	-0,008152	119,301411	4599,5	VERTICAL CURVE
8638,632535	791,249267	0,017786	80,400606	-	GRADE
8719,033141	792,679266	0,017786	169,158783	-3537,5	VERTICAL CURVE
8888,191924	791,643487	-0,030032	60,278826	-4645,9	VERTICAL CURVE
8948,470750	789,442137	-0,043007	249,674420	-	GRADE
9198,145170	778,704453	-0,043007	100,075724	9594,3	VERTICAL CURVE
9298,220894	774,922456	-0,032576	79,748198	2967,5	VERTICAL CURVE
9377,969092	773,396157	-0,005702	69,452568	8439,1	VERTICAL CURVE

9447,421661	773,285932	0,002528	169,911090	-	GRADE
9617,332750	773,715444	0,002528	49,863537	-6912,1	VERTICAL CURVE
9667,196288	773,661637	-0,004686	80,049876	-	GRADE
9747,246163	773,286520	-0,004686	100,349129	14431,0	VERTICAL CURVE
9847,595293	773,165180	0,002268	1198,566620	-	GRADE
11046,161912	775,883159	0,002268	129,670216	7019,3	VERTICAL CURVE
11175,832129	777,374933	0,020741	60,111442	-	GRADE
11235,943570	778,621707	0,020741	99,245447	-6309,1	VERTICAL CURVE
11335,189018	779,899571	0,005011	60,276044	-3634,4	VERTICAL CURVE
11395,465062	779,701753	-0,011574	159,481489	-	GRADE
11554,946551	777,855873	-0,011574	50,137834	13509,0	VERTICAL CURVE
11605,084384	777,368606	-0,007863	99,828895	6330,2	VERTICAL CURVE
11704,913279	777,370832	0,007907	219,791237	-	GRADE
11924,704516	779,108813	0,007907	80,501205	-5779,2	VERTICAL CURVE
12005,205721	779,184696	-0,006022	209,444422	-	GRADE
12214,650144	777,923389	-0,006022	100,099751	19715,3	VERTICAL CURVE
12314,749895	777,574688	-0,000945	59,253424	10770,2	VERTICAL CURVE
12374,003319	777,681694	0,004557	80,547168	11631,4	VERTICAL CURVE
12454,550487	778,327619	0,011482	49,715374	-	GRADE
12504,265861	778,898436	0,011482	89,935063	-14414,3	VERTICAL CURVE
12594,200924	779,650478	0,005242	109,553153	-5761,5	VERTICAL CURVE
12703,754077	779,183240	-0,013772	209,834383	-	GRADE
12913,588459	776,293339	-0,013772	79,913817	7975,4	VERTICAL CURVE
12993,502276	775,593111	-0,003752	230,232552	-	GRADE
13223,734828	774,729213	-0,003752	99,785383	13442,2	VERTICAL CURVE
13323,520212	774,725157	0,003671	568,769393	-	GRADE
13892,289604	776,813103	0,003671	69,484464	-14218,5	VERTICAL CURVE
13961,774068	776,898398	-0,001216	80,195125	-9540,4	VERTICAL CURVE
14041,969193	776,463835	-0,009622	89,876806	-	GRADE
14131,845999	775,599065	-0,009622	99,333476	-10463,8	VERTICAL CURVE
14231,179475	774,171815	-0,019115	440,365611	-	GRADE
14671,545086	765,754304	-0,019115	79,117109	17144,0	VERTICAL CURVE
14750,662196	764,424551	-0,014500	120,459524	7062,5	VERTICAL CURVE
14871,121720	763,705180	0,002556	568,663983	-	GRADE
15439,785702	765,158797	0,002556	149,703768	9382,7	VERTICAL CURVE
15589,489470	766,735759	0,018512	60,299254	-	GRADE
15649,788724	767,851992	0,018512	39,517335	8008,5	VERTICAL CURVE
15689,306059	768,681018	0,023446	59,473513	-	GRADE
15748,779571	770,075435	0,023446	89,982175	-9217,4	VERTICAL CURVE
15838,761746	771,745945	0,013684	70,282322	-3167,5	VERTICAL CURVE
15909,044068	771,927949	-0,008505	119,464710	-4117,7	VERTICAL CURVE
16028,508778	769,178988	-0,037517	110,224227	-	GRADE
16138,733005	765,043732	-0,037517	59,874099	4446,0	VERTICAL CURVE
16198,607104	763,200612	-0,024050	70,422423	2783,5	VERTICAL CURVE
16269,029527	762,397817	0,001250	178,973775	4419,8	VERTICAL CURVE
16448,003302	766,245240	0,041744	60,228126	-	GRADE
16508,231428	768,759395	0,041744	189,760340	-5048,9	VERTICAL CURVE
16697,991768	773,114688	0,004159	40,529641	-	GRADE
16738,521409	773,283259	0,004159	109,182987	10558,7	VERTICAL CURVE
16847,704395	774,301879	0,014500	39,874099	-	GRADE
16887,578495	774,880045	0,014500	150,336693	-9521,4	VERTICAL CURVE
17037,915188	775,873038	-0,001290	219,150936	-	GRADE
17257,066124	775,590440	-0,001290	109,702305	9428,4	VERTICAL CURVE
17366,768428	776,087186	0,010346	110,646920	-	GRADE
17477,415348	777,231912	0,010346	99,149627	-7691,9	VERTICAL CURVE
17576,564975	777,618666	-0,002544	139,554141	-4987,6	VERTICAL CURVE
17716,119116	775,311205	-0,030525	180,698259	-	GRADE
17896,817375	769,795441	-0,030525	39,049876	4393,6	VERTICAL CURVE
17935,867251	768,776989	-0,021637	100,149627	7476,3	VERTICAL CURVE
18036,016877	767,280848	-0,008241	110,149627	3130,7	VERTICAL CURVE

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

18146,166504	768,310815	0,026942	150,199502	-	GRADE
18296,366007	772,357556	0,026942	99,105261	-4633,5	VERTICAL CURVE
18395,471268	773,967816	0,005554	60,347666	-8627,2	VERTICAL CURVE
18455,818933	774,091889	-0,001442	129,966215	-	GRADE
18585,785149	773,904534	-0,001442	109,850468	9659,5	VERTICAL CURVE
18695,635617	774,370801	0,009931	69,304763	12089,6	VERTICAL CURVE
18764,940380	775,257692	0,015663	119,716837	-	GRADE
18884,657217	777,132849	0,015663	50,496236	-8298,6	VERTICAL CURVE
18935,153453	777,770152	0,009578	60,225336	-	GRADE
18995,378789	778,347013	0,009578	49,671135	4614,5	VERTICAL CURVE
19045,049924	779,090115	0,020343	109,833736	6090,6	VERTICAL CURVE
19154,883660	782,314747	0,038376	119,966137	-	GRADE
19274,849797	786,918556	0,038376	99,914876	-7466,4	VERTICAL CURVE
19374,764674	790,084358	0,024994	568,484537	-	GRADE
19943,249211	804,293095	0,024994	50,644429	-20224,4	VERTICAL CURVE
19993,893640	805,495495	0,022490	89,548175	-4572,3	VERTICAL CURVE
20083,441815	806,632527	0,002905	189,702911	-	GRADE
20273,144726	807,183597	0,002905	189,781019	4335,5	VERTICAL CURVE
20462,925745	811,888647	0,046679	129,950349	-	GRADE
20592,876093	817,954610	0,046679	89,865980	-2828,9	VERTICAL CURVE
20682,742073	820,722080	0,014912	779,099608	-	GRADE
21461,841681	832,339994	0,014912	50,000000	-8956,8	VERTICAL CURVE
21511,841681	832,946033	0,009330	209,219544	-	GRADE
21721,061225	834,897970	0,009330	70,000000	7444,0	VERTICAL CURVE
21791,061225	835,880165	0,018733	70,000000	4006,6	VERTICAL CURVE
21861,061225	837,802970	0,036204	109,876806	-	GRADE
21970,938031	841,780969	0,036204	209,896323	-6605,1	VERTICAL CURVE
22180,834354	846,045080	0,004426	59,882018	-	GRADE
22240,716371	846,310146	0,004426	69,730875	7843,2	VERTICAL CURVE
22310,447247	846,928784	0,013317	69,533453	4469,5	VERTICAL CURVE
22379,980700	848,395648	0,028875	70,282322	4471,9	VERTICAL CURVE
22450,263022	850,977312	0,044591	129,439469	-	GRADE
22579,702491	856,749147	0,044591	79,849690	-3678,8	VERTICAL CURVE
22659,552181	859,443144	0,022886	119,664862	-8715,6	VERTICAL CURVE
22779,217043	861,360263	0,009156	110,371354	-	GRADE
22889,588398	862,370798	0,009156	90,075724	13292,8	VERTICAL CURVE
22979,664122	863,500700	0,015932	119,611256	6954,6	VERTICAL CURVE
23099,275378	866,434945	0,033131	139,503051	9014,2	VERTICAL CURVE
23238,778429	872,136280	0,048607	340,083576	-	GRADE
23578,862006	888,666660	0,048607	89,628952	-4907,1	VERTICAL CURVE
23668,490958	892,204700	0,030342	249,189140	-5395,3	VERTICAL CURVE
23917,680098	894,010971	-0,015845	60,050483	-	GRADE
23977,730581	893,059494	-0,015845	119,654193	5211,3	VERTICAL CURVE
24097,384774	892,537272	0,007116	70,346113	3576,3	VERTICAL CURVE
24167,730887	893,729701	0,026786	60,050483	12478,2	VERTICAL CURVE
24227,781370	895,482709	0,031598	389,063252	-	GRADE
24616,844621	907,776501	0,031598	50,278826	-4968,3	VERTICAL CURVE
24667,123447	909,110824	0,021478	379,634248	-	GRADE
25046,757696	917,264786	0,021478	209,725368	8421,4	VERTICAL CURVE
25256,483063	924,380841	0,046382	439,060145	-	GRADE
25695,543208	944,745430	0,046382	109,456330	-4060,2	VERTICAL CURVE
25804,999538	948,346876	0,019424	80,303783	-6534,8	VERTICAL CURVE
25885,303321	949,413273	0,007135	59,652594	-5122,3	VERTICAL CURVE
25944,955915	949,491563	-0,004510	60,574066	-10944,6	VERTICAL CURVE
26005,529980	949,050723	-0,010045	199,608971	-	GRADE
26205,138951	947,045647	-0,010045	179,581232	-5643,2	VERTICAL CURVE
26384,720183	942,384361	-0,041868	370,163905	-	GRADE
26754,884088	926,886405	-0,041868	99,123015	5275,1	VERTICAL CURVE
26854,007102	923,667645	-0,023077	69,712169	9326,6	VERTICAL CURVE
26923,719271	922,319435	-0,015602	69,960299	-	GRADE

26993,679571	921,227886	-0,015602	120,481556	-6640,1	VERTICAL CURVE
27114,161127	918,255043	-0,033747	39,854279	-	GRADE
27154,015406	916,910084	-0,033747	49,341112	19204,8	VERTICAL CURVE
27203,356518	915,308356	-0,031178	110,076004	6221,9	VERTICAL CURVE
27313,432522	912,850157	-0,013486	60,303844	14915,0	VERTICAL CURVE
27373,736365	912,158812	-0,009443	139,702305	-	GRADE
27513,438670	910,839636	-0,009443	99,550678	-8998,2	VERTICAL CURVE
27612,989348	909,348916	-0,020506	199,841037	-5877,0	VERTICAL CURVE
27812,830385	901,853274	-0,054510	79,798990	-	GRADE
27892,629375	897,503444	-0,054510	229,967770	5677,5	VERTICAL CURVE
28122,597145	889,625354	-0,014005	119,071987	6349,7	VERTICAL CURVE
28241,669132	889,074203	0,004747	70,913773	-	GRADE
28312,582905	889,410862	0,004747	129,235724	-10357,9	VERTICAL CURVE
28441,818629	889,218168	-0,007730	79,700841	-	GRADE
28521,519470	888,602119	-0,007730	50,397542	6481,6	VERTICAL CURVE
28571,917012	888,408502	0,000046	40,347666	-	GRADE
28612,264678	888,410356	0,000046	139,802056	-17934,4	VERTICAL CURVE
28752,066734	887,871889	-0,007749	459,148303	-	GRADE
29211,215036	884,313845	-0,007749	109,430748	-16683,1	VERTICAL CURVE
29320,645784	883,106942	-0,014309	180,634578	-8013,8	VERTICAL CURVE
29501,280362	878,486513	-0,036849	218,965020	-	GRADE
29720,245382	870,417840	-0,036849	120,057463	-5645,7	VERTICAL CURVE
29840,302845	864,717295	-0,058114	39,854279	-	GRADE
29880,157124	862,401185	-0,058114	59,539151	7913,2	VERTICAL CURVE
29939,696275	859,165086	-0,050590	60,492625	5061,1	VERTICAL CURVE
30000,188899	856,466257	-0,038638	60,303844	5162,8	VERTICAL CURVE
30060,492743	854,488426	-0,026958	59,419047	4309,6	VERTICAL CURVE
30119,911790	853,296252	-0,013170	90,199502	6250,3	VERTICAL CURVE
30210,111292	852,759163	0,001261	59,419047	3390,9	VERTICAL CURVE
30269,530339	853,354706	0,018784	149,996128	5757,0	VERTICAL CURVE
30419,526467	858,126338	0,044839	50,169729	-	GRADE
30469,696196	860,375900	0,044839	59,571815	-21833,4	VERTICAL CURVE
30529,268011	862,965773	0,042111	169,997159	-7962,1	VERTICAL CURVE
30699,265170	868,309665	0,020760	628,836244	-	GRADE
31328,101414	881,364188	0,020760	130,289868	-7986,0	VERTICAL CURVE
31458,391281	883,006154	0,004445	169,317497	-8171,4	VERTICAL CURVE
31627,708779	882,004584	-0,016276	59,882018	-	GRADE
31687,590797	881,029964	-0,016276	130,210656	9631,9	VERTICAL CURVE
31817,801453	879,790832	-0,002757	69,963288	8351,2	VERTICAL CURVE
31887,764741	879,891002	0,005621	40,347666	-	GRADE
31928,112407	880,117778	0,005621	59,304763	-17151,2	VERTICAL CURVE
31987,417170	880,348573	0,002163	30,297790	-	GRADE
32017,714961	880,414101	0,002163	59,304763	14133,0	VERTICAL CURVE
32077,019724	880,666793	0,006359	60,447417	6890,5	VERTICAL CURVE
32137,467141	881,316318	0,015132	69,354639	4804,9	VERTICAL CURVE
32206,821780	882,866306	0,029566	120,587101	-	GRADE
32327,408881	886,431569	0,029566	259,095521	-4880,8	VERTICAL CURVE
32586,504402	887,214924	-0,023519	80,050483	-12733,6	VERTICAL CURVE
32666,554885	885,080593	-0,029806	70,314217	-	GRADE
32736,869102	882,984836	-0,029806	109,424780	11195,4	VERTICAL CURVE
32846,293882	880,258129	-0,020032	119,700841	3752,7	VERTICAL CURVE
32965,994723	879,769410	0,011866	210,189100	-	GRADE
33176,183823	882,263479	0,011866	119,683362	-6829,5	VERTICAL CURVE
33295,867185	882,634935	-0,005659	50,253968	-	GRADE
33346,121154	882,350572	-0,005659	39,353175	10715,9	VERTICAL CURVE
33385,474329	882,200151	-0,001986	140,745207	8507,0	VERTICAL CURVE
33526,219536	883,084903	0,014558	49,847541	-	GRADE
33576,067078	883,810608	0,014558	79,330996	-11138,3	VERTICAL CURVE
33655,398074	884,683036	0,007436	100,112915	-6775,2	VERTICAL CURVE
33755,510989	884,687830	-0,007340	40,347666	-	GRADE

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

33795,858655	884,391664	-0,007340	49,254888	10086,1	VERTICAL CURVE
33845,113543	884,150382	-0,002457	100,399005	7047,4	VERTICAL CURVE
33945,512548	884,618866	0,011789	458,607039	-	GRADE
34404,119587	890,025543	0,011789	60,049876	-12574,2	VERTICAL CURVE
34464,169462	890,590103	0,007014	70,199502	-16929,3	VERTICAL CURVE
34534,368965	890,936915	0,002867	459,608172	-	GRADE
34993,977137	892,254640	0,002867	59,897417	17144,6	VERTICAL CURVE
35053,874554	892,531001	0,006361	139,705132	4881,8	VERTICAL CURVE
35193,579686	895,418652	0,034979	59,754853	8837,8	VERTICAL CURVE
35253,334539	897,710798	0,041740	160,010975	-	GRADE
35413,345514	904,389627	0,041740	70,050483	18097,5	VERTICAL CURVE
35483,395997	907,449095	0,045611	159,715325	-	GRADE
35643,111321	914,733798	0,045611	60,250357	-13924,2	VERTICAL CURVE
35703,361678	917,351497	0,041284	59,617086	-4367,3	VERTICAL CURVE
35762,978764	919,405786	0,027633	149,598507	-6197,3	VERTICAL CURVE
35912,577272	921,733996	0,003493	259,890523	-	GRADE
36172,467795	922,641916	0,003493	149,781170	-8646,8	VERTICAL CURVE
36322,248965	921,867913	-0,013829	99,780094	-	GRADE
36422,029059	920,488095	-0,013829	159,943169	11468,2	VERTICAL CURVE
36581,972228	919,391639	0,000118	489,242650	-	GRADE
37071,214878	919,449383	0,000118	140,009123	12731,0	VERTICAL CURVE
37211,224001	920,235782	0,011116	79,350309	-	GRADE
37290,574310	921,117801	0,011116	20,289164	4204,2	VERTICAL CURVE
37310,863474	921,392283	0,015941	269,331845	-	GRADE
37580,195320	925,685830	0,015941	70,282322	-12810,5	VERTICAL CURVE
37650,477641	926,613439	0,010455	70,282322	-12217,0	VERTICAL CURVE
37720,759963	927,146091	0,004702	169,313359	-	GRADE
37890,073322	927,942261	0,004702	199,291475	11073,9	VERTICAL CURVE
38089,364797	930,672666	0,022699	50,429136	-	GRADE
38139,793933	931,817346	0,022699	89,977311	-13078,8	VERTICAL CURVE
38229,771244	933,550217	0,015819	60,127620	-4971,3	VERTICAL CURVE
38289,898864	934,137768	0,003724	99,725600	-4289,5	VERTICAL CURVE
38389,624464	933,349926	-0,019525	309,669377	-	GRADE
38699,293842	927,303780	-0,019525	70,282322	-16559,4	VERTICAL CURVE
38769,576163	925,782403	-0,023769	119,068797	-7088,8	VERTICAL CURVE
38888,644960	921,952296	-0,040566	70,394996	-	GRADE
38959,039957	919,096682	-0,040566	179,766262	6612,8	VERTICAL CURVE
39138,806219	914,247804	-0,013381	90,083226	4167,3	VERTICAL CURVE
39228,889445	914,016064	0,008236	348,910155	-	GRADE
39577,799600	916,889638	0,008236	119,748891	8872,6	VERTICAL CURVE
39697,548490	918,683969	0,021732	109,525831	-	GRADE
39807,074321	921,064226	0,021732	69,954436	-8724,1	VERTICAL CURVE
39877,028757	922,304034	0,013714	59,840124	-	GRADE
39936,868881	923,124670	0,013714	110,095542	7544,5	VERTICAL CURVE
40046,964423	925,437806	0,028307	180,027713	-	GRADE
40226,992137	930,533799	0,028307	219,018906	-9725,2	VERTICAL CURVE
40446,011043	934,267277	0,005786	69,809981	-	GRADE
40515,821024	934,671199	0,005786	129,752712	6552,2	VERTICAL CURVE
40645,573736	936,706690	0,025589	59,913413	-	GRADE
40705,487149	938,239808	0,025589	160,582623	-6501,5	VERTICAL CURVE
40866,069772	940,365795	0,000890	149,285579	-	GRADE
41015,355351	940,498588	0,000890	49,497475	17612,5	VERTICAL CURVE
41064,852825	940,612170	0,003700	110,355746	13181,7	VERTICAL CURVE
41175,208572	941,482417	0,012072	59,447670	6974,8	VERTICAL CURVE
41234,656242	942,453400	0,020595	358,865341	-	GRADE
41593,521583	949,844234	0,020595	60,288071	-10883,1	VERTICAL CURVE
41653,809653	950,918880	0,015055	449,431464	-	GRADE
42103,241117	957,685243	0,015055	50,193605	16562,1	VERTICAL CURVE
42153,434722	958,516985	0,018086	69,467335	9050,5	VERTICAL CURVE
42222,902057	960,039972	0,025762	89,823658	-	GRADE

42312,725715	962,353968	0,025762	79,548175	-4618,7	VERTICAL CURVE
42392,273890	963,718218	0,008538	290,108462	-	GRADE
42682,382352	966,195291	0,008538	159,173270	5977,8	VERTICAL CURVE
42841,555622	969,673582	0,035166	60,127620	4458,7	VERTICAL CURVE
42901,683243	972,193451	0,048651	159,853221	-	GRADE
43061,536464	979,970526	0,048651	59,396970	-5940,4	VERTICAL CURVE
43120,933433	982,563319	0,038653	469,660167	-	GRADE
43590,593601	1000,716868	0,038653	69,296465	9767,7	VERTICAL CURVE
43659,890065	1003,641162	0,045747	200,134763	-	GRADE
43860,024828	1012,796726	0,045747	90,556756	-11524,6	VERTICAL CURVE
43950,581585	1016,583642	0,037889	89,348061	-4213,4	VERTICAL CURVE
44039,929645	1019,021626	0,016683	210,006218	-	GRADE
44249,935863	1022,525252	0,016683	139,876806	5129,4	VERTICAL CURVE
44389,812669	1026,766074	0,043953	309,653106	-	GRADE
44699,465775	1040,376287	0,043953	140,458043	7836,7	VERTICAL CURVE
44839,923817	1047,808571	0,061876	1386,795223	-	GRADE
46226,719040	1133,618122	0,061876	199,007068	-5315,3	VERTICAL CURVE
46425,726108	1142,206489	0,024436	70,049876	-2744,8	VERTICAL CURVE
46495,775984	1143,024363	-0,001085	199,634250	-	GRADE
46695,410234	1142,807789	-0,001085	69,973592	5107,0	VERTICAL CURVE
46765,383826	1143,211254	0,012617	99,927506	8512,7	VERTICAL CURVE
46865,311332	1145,058523	0,024355	90,028011	-	GRADE
46955,339343	1147,251192	0,024355	99,977311	9455,6	VERTICAL CURVE
47055,316654	1150,214727	0,034929	99,247556	-	GRADE
47154,564209	1153,681319	0,034929	90,657261	-7942,6	VERTICAL CURVE
47245,221471	1156,330479	0,023515	39,597980	-	GRADE
47284,819450	1157,261613	0,023515	110,406446	13089,5	VERTICAL CURVE
47395,225897	1160,323410	0,031949	269,050076	-	GRADE
47664,275973	1168,919407	0,031949	50,228126	6062,2	VERTICAL CURVE
47714,504098	1170,732250	0,040235	59,447670	4984,4	VERTICAL CURVE
47773,951768	1173,478635	0,052162	140,104931	-	GRADE
47914,056700	1180,786759	0,052162	79,497475	-8657,4	VERTICAL CURVE
47993,554174	1184,568492	0,042979	40,315018	-	GRADE
48033,869192	1186,301197	0,042979	89,114287	16396,5	VERTICAL CURVE
48122,983479	1190,373420	0,048414	30,036198	-	GRADE
48153,019677	1191,827596	0,048414	240,001042	-7907,9	VERTICAL CURVE
48393,020719	1199,805087	0,018065	59,353175	-	GRADE
48452,373894	1200,877283	0,018065	79,750544	9576,7	VERTICAL CURVE
48532,124439	1202,650015	0,026392	69,999820	3197,4	VERTICAL CURVE
48602,124259	1205,263713	0,048285	130,434233	6420,1	VERTICAL CURVE
48732,558492	1212,886712	0,068601	589,429282	-	GRADE
49321,987774	1253,322406	0,068601	129,452397	-2516,0	VERTICAL CURVE
49451,440171	1258,872694	0,017149	50,052318	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.4 RECONSTRUCCIÓN M-607: PENDIENTES, TRAMO 12 KM

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607: PK 36+000 al 48+300 (Madrid) - Pendientes MFOM

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 1401
 Longitud (m) : 13981.1
 Separación media (m) : 9.99
 Altitud máxima (m) : 998.0
 Altitud media (m) : 950.79
 Altitud mínima (m) : 902.6
 Pendiente media : -0.0016

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 3.0E-5
 Kv límite : 33333
 Rectas Interpolación (Puntos) : 13
 Rectas Interpolación (m) : 119.84

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.046041
 Valor absoluto del Error (varianza) : 0.015651
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.125105
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.174515
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 0.578048

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 63
 Grades : 19
 Vertical curves : 44
 Cuasi grades : 0
 Short alignments (L<50.00 m) : 0
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
35000,000000	998,000000	-0,007061	178,957781	-10018,0	VERTICAL CURVE
35178,957781	995,137870	-0,024925	100,230922	-6108,8	VERTICAL CURVE
35279,188704	991,817316	-0,041333	359,965866	-	GRADE
35639,154570	976,938884	-0,041333	179,033223	6156,3	VERTICAL CURVE
35818,187793	972,142184	-0,012252	219,855828	-9451,6	VERTICAL CURVE
36038,043620	966,891534	-0,035513	209,913351	8300,6	VERTICAL CURVE
36247,956972	962,091149	-0,010224	179,203644	-	GRADE
36427,160615	960,258986	-0,010224	140,283945	-6394,9	VERTICAL CURVE
36567,444561	957,286045	-0,032161	199,753840	-7667,2	VERTICAL CURVE
36767,198401	948,259716	-0,058214	359,452420	5607,4	VERTICAL CURVE
37126,650821	938,855713	0,005890	229,884244	-16740,9	VERTICAL CURVE
37356,535065	938,631300	-0,007842	140,000095	18148,1	VERTICAL CURVE
37496,535160	938,073400	-0,000128	150,000095	-19645,8	VERTICAL CURVE
37646,535255	937,481581	-0,007763	499,297929	-	GRADE
38145,833184	933,605492	-0,007763	309,120711	-9785,5	VERTICAL CURVE
38454,953895	926,323250	-0,039353	159,760008	-	GRADE
38614,713903	920,036251	-0,039353	159,911742	-7757,2	VERTICAL CURVE

38774,625645	912,095024	-0,059967	130,472082	5587,7	VERTICAL CURVE
38905,097727	905,794211	-0,036617	199,482087	4895,6	VERTICAL CURVE
39104,579813	902,553855	0,004130	209,415175	4764,6	VERTICAL CURVE
39313,994988	908,020836	0,048082	309,888330	-11395,6	VERTICAL CURVE
39623,883318	918,707402	0,020888	598,686617	-	GRADE
40222,569935	931,212978	0,020888	110,145380	-8044,7	VERTICAL CURVE
40332,715315	932,759699	0,007197	209,719148	-7992,8	VERTICAL CURVE
40542,434463	931,517642	-0,019042	260,046715	10891,4	VERTICAL CURVE
40802,481177	929,670391	0,004835	129,802056	-	GRADE
40932,283233	930,297936	0,004835	219,256446	7280,0	VERTICAL CURVE
41151,539679	934,659693	0,034952	259,427756	-5918,2	VERTICAL CURVE
41410,967436	938,041212	-0,008883	210,074558	-7238,1	VERTICAL CURVE
41621,041993	933,126573	-0,037906	259,521002	5248,7	VERTICAL CURVE
41880,562996	929,705038	0,011538	190,089349	-	GRADE
42070,652344	931,898343	0,011538	149,541252	-7881,7	VERTICAL CURVE
42220,193597	932,205157	-0,007435	229,945924	9328,0	VERTICAL CURVE
42450,139521	933,329755	0,017216	220,087904	-8431,1	VERTICAL CURVE
42670,227425	934,246236	-0,008888	169,753644	8338,2	VERTICAL CURVE
42839,981069	934,465429	0,011470	458,607039	-	GRADE
43298,588108	939,725865	0,011470	130,249378	-14983,2	VERTICAL CURVE
43428,837486	940,653755	0,002777	479,856087	-	GRADE
43908,693573	941,986521	0,002777	199,084246	5080,6	VERTICAL CURVE
44107,777819	946,440056	0,041963	449,729164	-	GRADE
44557,506982	965,311941	0,041963	109,990179	-8271,5	VERTICAL CURVE
44667,497161	969,196142	0,028665	129,498756	-5109,0	VERTICAL CURVE
44796,995917	971,267066	0,003318	249,302053	-	GRADE
45046,297970	972,094329	0,003318	170,419515	-10494,9	VERTICAL CURVE
45216,717486	971,276168	-0,012920	99,780094	-	GRADE
45316,497580	969,987004	-0,012920	139,798681	11020,0	VERTICAL CURVE
45456,296261	969,067539	-0,000234	509,387138	-	GRADE
45965,683399	968,948293	-0,000234	159,344813	13330,1	VERTICAL CURVE
46125,028213	969,863378	0,011720	110,441805	25696,6	VERTICAL CURVE
46235,470018	971,395057	0,016018	239,193823	-	GRADE
46474,663841	975,226371	0,016018	200,551335	-15251,7	VERTICAL CURVE
46675,215176	977,120154	0,002868	109,326668	-	GRADE
46784,541843	977,433722	0,002868	120,044815	9407,6	VERTICAL CURVE
46904,586658	978,543941	0,015629	129,675796	10474,2	VERTICAL CURVE
47034,262454	981,373315	0,028009	269,730026	-5673,2	VERTICAL CURVE
47303,992481	982,516073	-0,019536	309,914370	-	GRADE
47613,906851	976,461668	-0,019536	230,114794	-8860,1	VERTICAL CURVE
47844,021645	968,977921	-0,045508	268,896014	5326,2	VERTICAL CURVE
48112,917659	963,528664	0,004977	149,697292	-	GRADE
48262,614951	964,273748	0,004977	59,879997	11115,9	VERTICAL CURVE
48322,494948	964,733069	0,010364	149,773172	-	GRADE
48472,268121	966,285339	0,010364	140,387236	13619,8	VERTICAL CURVE
48612,655357	968,463857	0,020672	368,443086	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.5 RECONSTRUCCIÓN N-320: PENDIENTES MFOM

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

N-320 PK 333 al PK 340+900 (Madrid) - Pendientes MFOM

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 789
 Longitud (m) : 7860.17
 Separación media (m) : 9.97
 Altitud máxima (m) : 841.92
 Altitud media (m) : 765.01
 Altitud mínima (m) : 715.02
 Pendiente media : 0.0146

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 4.0E-5
 Kv límite : 25000
 Rectas Interpolación (Puntos) : 9
 Rectas Interpolación (m) : 79.8

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.116773
 Valor absoluto del Error (varianza) : 0.044981
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.212087
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.26877
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 1.114361

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 61
 Grades : 13
 Vertical curves : 48
 Cuasi grades : 0
 Short alignments (L<50.00 m) : 1
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	727,000000	0,034150	89,300000	14790,5	VERTICAL CURVE
89,300000	730,319200	0,040188	69,730000	-	GRADE
159,030000	733,121505	0,040188	128,940000	-3815,3	VERTICAL CURVE
287,970000	736,124515	0,006392	169,570000	-3937,8	VERTICAL CURVE
457,540000	733,557388	-0,036670	120,430000	-20960,5	VERTICAL CURVE
577,970000	728,795237	-0,042416	198,930000	3478,3	VERTICAL CURVE
776,900000	726,046100	0,014776	220,040000	-4707,2	VERTICAL CURVE
996,940000	724,154612	-0,031969	139,610000	7351,2	VERTICAL CURVE
1136,550000	721,017165	-0,012977	99,420000	7741,0	VERTICAL CURVE
1235,970000	720,365406	-0,000134	130,000000	-5097,3	VERTICAL CURVE
1365,970000	718,690240	-0,025638	149,010000	8404,4	VERTICAL CURVE
1514,980000	716,190920	-0,007908	80,300000	-	GRADE
1595,280000	715,555920	-0,007908	79,300000	7643,8	VERTICAL CURVE
1674,580000	715,340174	0,002467	119,970000	-21648,7	VERTICAL CURVE
1794,550000	715,303676	-0,003075	129,920000	12230,9	VERTICAL CURVE
1924,470000	715,594186	0,007547	89,860000	4885,2	VERTICAL CURVE
2014,330000	717,098838	0,025942	229,520000	-9932,1	VERTICAL CURVE

2243,850000	720,400970	0,002833	89,100000	-	GRADE
2332,950000	720,653358	0,002833	140,090000	6708,7	VERTICAL CURVE
2473,040000	722,512857	0,023715	129,280000	4135,0	VERTICAL CURVE
2602,320000	727,599636	0,054979	209,930000	-9525,9	VERTICAL CURVE
2812,250000	736,828260	0,032942	129,770000	7552,6	VERTICAL CURVE
2942,020000	742,217953	0,050124	79,520000	5722,6	VERTICAL CURVE
3021,540000	746,756292	0,064020	139,900000	-	GRADE
3161,440000	755,712628	0,064020	148,810000	-16410,7	VERTICAL CURVE
3310,250000	764,564684	0,054952	349,410000	-	GRADE
3659,660000	783,765358	0,054952	149,700000	8585,5	VERTICAL CURVE
3809,360000	793,296743	0,072388	129,380000	-4691,1	VERTICAL CURVE
3938,740000	800,878171	0,044808	190,540000	-4514,4	VERTICAL CURVE
4129,280000	805,394798	0,002601	89,590000	-6367,7	VERTICAL CURVE
4218,870000	804,997541	-0,011469	109,560000	-5960,9	VERTICAL CURVE
4328,430000	802,734167	-0,029849	80,200000	-4292,5	VERTICAL CURVE
4408,630000	799,591096	-0,048532	79,020000	-11091,1	VERTICAL CURVE
4487,650000	795,474590	-0,055657	89,850000	-3926,1	VERTICAL CURVE
4577,500000	789,445703	-0,078542	129,740000	-17235,8	VERTICAL CURVE
4707,240000	778,767345	-0,086069	139,570000	2279,7	VERTICAL CURVE
4846,810000	771,027014	-0,024847	90,610000	2849,2	VERTICAL CURVE
4937,420000	770,216390	0,006955	169,230000	-7481,7	VERTICAL CURVE
5106,650000	769,479409	-0,015665	99,870000	15056,6	VERTICAL CURVE
5206,520000	768,246209	-0,009032	79,350000	-	GRADE
5285,870000	767,529554	-0,009032	99,830000	10900,1	VERTICAL CURVE
5385,700000	767,085087	0,000127	139,390000	4133,0	VERTICAL CURVE
5525,090000	769,453333	0,033853	129,960000	-7156,8	VERTICAL CURVE
5655,050000	772,672915	0,015694	189,610000	-12352,9	VERTICAL CURVE
5844,660000	774,193490	0,000345	129,700000	9473,0	VERTICAL CURVE
5974,360000	775,126104	0,014036	79,730000	3738,2	VERTICAL CURVE
6054,090000	777,095474	0,035365	139,480000	-	GRADE
6193,570000	782,028134	0,035365	59,850000	-9751,0	VERTICAL CURVE
6253,420000	783,961034	0,029227	80,700000	-	GRADE
6334,120000	786,319639	0,029227	59,500000	-10756,4	VERTICAL CURVE
6393,620000	787,894071	0,023695	70,130000	-	GRADE
6463,750000	789,555819	0,023695	49,500000	-10124,5	VERTICAL CURVE
6513,250000	790,607728	0,018806	129,430000	-9757,1	VERTICAL CURVE
6642,680000	792,183346	0,005541	110,000000	6003,0	VERTICAL CURVE
6752,680000	793,800672	0,023865	110,060000	-	GRADE
6862,740000	796,427256	0,023865	79,650000	5423,2	VERTICAL CURVE
6942,390000	798,913006	0,038552	349,620000	-	GRADE
7292,010000	812,391481	0,038552	129,420000	4468,8	VERTICAL CURVE
7421,430000	819,254888	0,067512	259,360000	-	GRADE
7680,790000	836,764876	0,067512	80,080000	-1656,7	VERTICAL CURVE
7760,870000	840,235890	0,019176	99,300000	-	GRADE

SE=Abcisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.6 RECONSTRUCCIÓN N-403: PENDIENTES MFOM, TOLEDO

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

N-403 Tramo Toledo-Rielves (Toledo) - PK 5+000 al 20+000 - Pendientes MFOM
Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 1459
Longitud (m) : 14563.48
Separación media (m) : 9.99
Altitud máxima (m) : 492.99
Altitud media (m) : 492.45
Altitud mínima (m) : 491.38
Pendiente media : -0.0

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 1.0E-7
Kv límite : 10000000
Rectas Interpolación (Puntos) : 6
Rectas Interpolación (m) : 49.94

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.000044
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.000015
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.003855
Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.005444
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 0.028107

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 61
Grades : 15
Vertical curves : 44
Cuasi grades : 2
Short alignments (L<50.00 m) : 2
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	492,000000	0,000496	449,239701	-	GRADE
449,239701	492,222618	0,000535	249,775105	-1609833,2	VERTICAL CURVE
699,014806	492,336948	0,000380	159,187667	-	GRADE
858,202473	492,397465	0,000380	160,615335	662631,0	VERTICAL CURVE
1018,817808	492,477990	0,000623	69,629106	-322204,9	VERTICAL CURVE
1088,446914	492,513814	0,000406	289,579717	2618418,0	VERTICAL CURVE
1378,026631	492,647525	0,000517	70,027115	-	GRADE
1448,053746	492,683731	0,000517	249,931932	-273558,2	VERTICAL CURVE
1697,985679	492,698783	-0,000397	198,922455	-819879,8	VERTICAL CURVE
1896,908134	492,595760	-0,000639	300,210758	323838,9	VERTICAL CURVE
2197,118892	492,543013	0,000288	489,352706	3426472,0	VERTICAL CURVE
2686,471598	492,718801	0,000431	129,905052	-1044786,5	VERTICAL CURVE
2816,376650	492,766667	0,000306	169,392794	1006981,9	VERTICAL CURVE
2985,769444	492,832799	0,000475	269,933299	-1391150,0	VERTICAL CURVE
3255,702742	492,934698	0,000280	549,228550	-767153,0	VERTICAL CURVE
3804,931293	492,892141	-0,000435	89,678731	325839,8	VERTICAL CURVE
3894,610024	492,865431	-0,000160	179,501512	-965068,7	VERTICAL CURVE

4074,111536	492,819976	-0,000346	450,326043	1303606,0	VERTICAL CURVE
4524,437580	492,741843	-0,000001	398,532174	-1736986,0	VERTICAL CURVE
4922,969754	492,695813	-0,000230	180,562052	-2101488,9	VERTICAL CURVE
5103,531806	492,646487	-0,000316	89,075451	-	GRADE
5192,607257	492,618327	-0,000316	60,493287	-1067893,2	VERTICAL CURVE
5253,100544	492,597489	-0,000373	239,946766	-	GRADE
5493,047310	492,508040	-0,000373	439,311972	-3432046,0	VERTICAL CURVE
5932,359282	492,316153	-0,000501	109,549071	-	GRADE
6041,908352	492,261292	-0,000501	150,523576	1011370,3	VERTICAL CURVE
6192,431928	492,197113	-0,000352	259,133423	-2727787,2	VERTICAL CURVE
6451,565352	492,093600	-0,000447	109,776950	2531426,1	VERTICAL CURVE
6561,342301	492,046915	-0,000404	169,933203	-	GRADE
6731,275504	491,978331	-0,000404	260,497761	1467013,8	VERTICAL CURVE
6991,773266	491,896325	-0,000226	218,885298	-	GRADE
7210,658564	491,846853	-0,000226	169,576186	-836454,9	VERTICAL CURVE
7380,234750	491,791336	-0,000429	849,423922	-	GRADE
8229,658672	491,427143	-0,000429	290,324235	600317,2	VERTICAL CURVE
8519,982908	491,372868	0,000055	469,464933	5350675,9	VERTICAL CURVE
8989,447841	491,419221	0,000143	469,318671	-	GRADE
9458,766512	491,486148	0,000143	259,552033	1052144,6	VERTICAL CURVE
9718,318545	491,555176	0,000389	399,504634	-1637237,3	VERTICAL CURVE
10117,823178	491,661958	0,000145	69,960299	2700282,4	VERTICAL CURVE
10187,783478	491,673028	0,000171	200,096044	-	GRADE
10387,879522	491,707283	0,000190	149,439433	-4952364,5	VERTICAL CURVE
10537,318955	491,733471	0,000160	189,985760	677297,7	VERTICAL CURVE
10727,304715	491,790544	0,000441	130,433766	-1857016,8	VERTICAL CURVE
10857,738481	491,843440	0,000370	269,038866	-412599,9	VERTICAL CURVE
11126,777347	491,855383	-0,000282	229,978348	-	GRADE
11356,755695	491,790613	-0,000282	129,564378	332526,4	VERTICAL CURVE
11486,320074	491,779364	0,000108	639,977136	-	GRADE
12126,297210	491,848482	0,000108	179,678055	-595260,5	VERTICAL CURVE
12305,975265	491,840769	-0,000194	378,925818	749316,7	VERTICAL CURVE
12684,901083	491,863126	0,000312	239,954099	-707273,2	VERTICAL CURVE
12924,855182	491,897250	-0,000027	150,493506	1152624,7	VERTICAL CURVE
13075,348688	491,902949	0,000103	58,928544	-594524,7	VERTICAL CURVE
13134,277233	491,906106	0,000004	260,147258	6534257,4	VERTICAL CURVE
13394,424491	491,912333	0,000044	59,914019	-2481004,2	VERTICAL CURVE
13454,338510	491,914236	0,000020	10,440307	-	GRADE
13464,778817	491,914442	0,000020	30,106020	-6518016,4	VERTICAL CURVE
13494,884837	491,914965	0,000015	169,269750	-	GRADE
13664,154587	491,917516	0,000015	210,114098	-421275,1	VERTICAL CURVE
13874,268685	491,868285	-0,000484	219,753281	-	GRADE
14094,021966	491,761994	-0,000484	129,554141	491534,2	VERTICAL CURVE
14223,576108	491,716404	-0,000220	339,900439	-	GRADE

SE=Abcisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.7 RECONSTRUCCIÓN N-403: PENDIENTES MFOM, ÁVILA

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

N-403 Tramo Casas del Burguillo - ElBarraco (PK 96+000 al 108+000) (Ávila) - Pendientes MFOM
Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 1202
Longitud (m) : 12040.71
Separación media (m) : 10.03
Altitud máxima (m) : 944.75
Altitud media (m) : 788.64
Altitud mínima (m) : 712.06
Pendiente media : 0.0149

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 3.75E-5
Kv límite : 26667
Rectas Interpolación (Puntos) : 15
Rectas Interpolación (m) : 140.36

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.321323
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.134562
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.366827
Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.432778
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 1.865037

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 61
Grades : 20
Vertical curves : 41
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 1
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K
0,000000	765,000000	-0,052939	270,239751	- GRADE
270,239751	750,693841	-0,052939	140,301584	3180,9 VERTICAL CURVE
410,541335	746,360628	-0,008831	210,318360	- GRADE
620,859695	744,503261	-0,008831	80,724943	-4674,3 VERTICAL CURVE
701,584638	743,093310	-0,026101	210,603606	11890,8 VERTICAL CURVE
912,188243	739,461394	-0,008390	60,224930	- GRADE
972,413173	738,956134	-0,008390	70,199502	4211,1 VERTICAL CURVE
1042,612676	738,952312	0,008281	251,008082	-8408,5 VERTICAL CURVE
1293,620758	737,284324	-0,021571	90,437864	- GRADE
1384,058622	735,333494	-0,021571	49,941645	12356,0 VERTICAL CURVE
1434,000267	734,357135	-0,017529	110,014627	10050,8 VERTICAL CURVE
1544,014895	733,030784	-0,006583	641,962940	- GRADE
2185,977835	728,804594	-0,006583	120,334161	1673,6 VERTICAL CURVE
2306,311996	732,338433	0,065317	310,459986	- GRADE
2616,771981	752,616745	0,065317	179,549924	-4324,5 VERTICAL CURVE
2796,321906	760,617051	0,023798	60,473466	-2982,8 VERTICAL CURVE
2856,795372	761,443191	0,003524	540,590630	-7338,3 VERTICAL CURVE

3397,386002	743,436438	-0,070143	230,158463	2253,3 VERTICAL CURVE
3627,544465	739,047041	0,032001	220,133848	-3767,3 VERTICAL CURVE
3847,678313	739,659879	-0,026433	59,629106	-2110,0 VERTICAL CURVE
3907,307419	737,241162	-0,054693	281,125179	- GRADE
4188,432598	721,865708	-0,054693	250,582997	4678,9 VERTICAL CURVE
4439,015596	714,870724	-0,001137	130,131666	- GRADE
4569,147262	714,722747	-0,001137	161,057053	-7407,3 VERTICAL CURVE
4730,204315	712,788681	-0,022880	129,854813	2854,0 VERTICAL CURVE
4860,059128	712,771762	0,022619	200,615126	- GRADE
5060,674254	717,309566	0,022619	130,747681	4597,8 VERTICAL CURVE
5191,421935	722,126059	0,051057	250,918930	-6824,1 VERTICAL CURVE
5442,340865	730,324082	0,014287	170,152745	4068,8 VERTICAL CURVE
5612,493610	736,312895	0,056106	230,487527	- GRADE
5842,981137	749,244651	0,056106	110,353935	-11055,8 VERTICAL CURVE
5953,335073	754,885427	0,046125	70,112058	-6995,4 VERTICAL CURVE
6023,447131	757,767960	0,036102	220,737720	9768,7 VERTICAL CURVE
6244,184851	768,230971	0,058698	211,235988	-2622,4 VERTICAL CURVE
6455,420839	772,122718	-0,021851	200,354136	4409,8 VERTICAL CURVE
6655,774974	772,296147	0,023582	80,309491	- GRADE
6736,084465	774,190030	0,023582	110,607281	17994,8 VERTICAL CURVE
6846,691746	777,138335	0,029729	460,815747	- GRADE
7307,507493	790,837891	0,029729	100,302328	-4503,1 VERTICAL CURVE
7407,809822	792,702692	0,007455	301,441469	16715,4 VERTICAL CURVE
7709,251291	797,667904	0,025488	109,818355	-9932,2 VERTICAL CURVE
7819,069646	799,859882	0,014432	150,167259	- GRADE
7969,236905	802,027041	0,014432	150,368756	6128,0 VERTICAL CURVE
8119,605661	806,041977	0,038970	321,139185	- GRADE
8440,744846	818,556635	0,038970	101,061314	7518,4 VERTICAL CURVE
8541,806160	823,174181	0,052411	250,136974	- GRADE
8791,943135	836,284231	0,052411	139,952811	-3594,8 VERTICAL CURVE
8931,895945	840,895039	0,013479	111,303094	- GRADE
9043,199040	842,395340	0,013479	109,953494	-3057,9 VERTICAL CURVE
9153,152534	841,900667	-0,022477	279,994302	7123,4 VERTICAL CURVE
9433,146835	841,109944	0,016829	200,842448	7766,1 VERTICAL CURVE
9633,989283	847,086979	0,042691	140,272851	- GRADE
9774,262134	853,075298	0,042691	120,271316	7328,3 VERTICAL CURVE
9894,533450	859,196689	0,059103	181,113758	- GRADE
10075,647208	869,900967	0,059103	110,100325	-2094,3 VERTICAL CURVE
10185,747533	873,514090	0,006531	169,998833	7440,2 VERTICAL CURVE
10355,746366	876,566435	0,029379	161,069904	-7033,9 VERTICAL CURVE
10516,816270	879,454400	0,006480	421,051252	- GRADE
10937,867523	882,182964	0,006480	240,298427	3917,3 VERTICAL CURVE
11178,165950	891,110423	0,067823	631,353963	- GRADE
11809,519912	933,930576	0,067823	231,186328	-5564,1 VERTICAL CURVE

SE=Abcisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.8 RECONSTRUCCIÓN M-607: GNSS TOPCON

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Descendente - GPS Topcon
Tramo : 14360.0 - 18075.0

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 1704
Longitud (m) : 3713.79
Separación media (m) : 2.18
Altitud máxima (m) : 951.01
Altitud media (m) : 941.14
Altitud mínima (m) : 933.23
Pendiente media : 0.0045

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 1.75E-5
Kv límite : 57143
Rectas Interpolación (Puntos) : 19
Rectas Interpolación (m) : 39.25

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.007679
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.003188
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.056463
Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.067047
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 0.325057

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 27
Grades : 7
Vertical curves : 20
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 2
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
14360,462392	934,338000	0,019161	202,214875	-9257,2	VERTICAL CURVE
14562,677267	936,004074	-0,002683	77,876110	-5322,2	VERTICAL CURVE
14640,553377	935,225393	-0,017315	261,670798	12494,1	VERTICAL CURVE
14902,224175	933,434709	0,003629	162,420326	-	GRADE
15064,644501	934,024056	0,003629	86,455418	6239,1	VERTICAL CURVE
15151,099919	934,936775	0,017486	137,964733	5364,4	VERTICAL CURVE
15289,064652	939,123314	0,043204	81,890420	-4145,8	VERTICAL CURVE
15370,955072	941,852555	0,023452	97,002575	-5917,7	VERTICAL CURVE
15467,957647	943,332387	0,007060	153,111928	-5530,2	VERTICAL CURVE
15621,069575	942,293744	-0,020627	53,007470	-7506,5	VERTICAL CURVE
15674,077045	941,013217	-0,027688	172,002846	-	GRADE
15846,079891	936,250760	-0,027688	142,552958	3506,6	VERTICAL CURVE
15988,632849	935,201298	0,012964	186,912628	-	GRADE
16175,545477	937,624515	0,012964	173,278293	-8713,9	VERTICAL CURVE
16348,823770	938,148127	-0,006921	261,559979	10286,2	VERTICAL CURVE
16610,383749	939,663433	0,018508	76,058502	-7142,0	VERTICAL CURVE
16686,442251	940,666097	0,007858	76,105277	-5939,6	VERTICAL CURVE

16762,547528	940,776564	-0,004955	98,848366	-	GRADE
16861,395894	940,286759	-0,004955	79,939549	4354,4	VERTICAL CURVE
16941,335443	940,624429	0,013403	447,598511	-	GRADE
17388,933954	946,623698	0,013403	112,991003	-46165,2	VERTICAL CURVE
17501,924957	947,999869	0,010956	69,300026	-8872,2	VERTICAL CURVE
17571,224983	948,488450	0,003145	238,131529	49822,2	VERTICAL CURVE
17809,356512	949,806403	0,007924	83,251167	-17045,2	VERTICAL CURVE
17892,607679	950,262810	0,003040	128,460746	-	GRADE
18021,068425	950,653358	0,003040	12,741335	3720,6	VERTICAL CURVE
18033,809760	950,713911	0,006465	40,446141	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Descendente - GPS Topcon
Tramo : 18206.0 - 19277.0

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 468
Longitud (m) : 1039.87
Separación media (m) : 2.23
Altitud máxima (m) : 983.27
Altitud media (m) : 975.79
Altitud mínima (m) : 954.46
Pendiente media : 0.0277

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 1.25E-5
Kv límite : 80000
Rectas Interpolación (Puntos) : 13
Rectas Interpolación (m) : 26.72

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.003081
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.001301
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.036074
Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.042263
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 0.222032

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 8
Grades : 2
Vertical curves : 6
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 0
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
18205,709912	954,459000	0,038826	56,767954	11322,8	VERTICAL CURVE
18262,477866	956,805370	0,043839	120,964897	-60770,3	VERTICAL CURVE
18383,442763	961,988014	0,041849	109,301287	21192,9	VERTICAL CURVE
18492,744050	966,844014	0,047006	162,030242	-	GRADE
18654,774292	974,460470	0,047006	52,108846	-10779,1	VERTICAL CURVE
18706,883138	976,783965	0,042172	217,427409	-5894,7	VERTICAL CURVE
18924,310547	981,943418	0,005287	232,986420	-	GRADE

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

19157,296967 983,175202 0,005287 88,279681 -9871,3 VERTICAL CURVE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Descendente - GPS Topcon

Tramo : 22241.0 - 25325.0

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 1409
Longitud (m) : 3084.92
Separación media (m) : 2.19
Altitud máxima (m) : 949.08
Altitud media (m) : 940.36
Altitud mínima (m) : 933.86
Pendiente media : -0.004

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 1.0E-4
Kv límite : 10000
Rectas Interpolación (Puntos) : 21
Rectas Interpolación (m) : 43.82

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.009073
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.003522
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.059345
Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.074595
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 0.244862

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 21
Grades : 11
Vertical curves : 10
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 5
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K
22241,034184	949,075000	-0,005238	60,082836	- GRADE
22301,117020	948,760303	-0,005238	21,406558	-2652,6 VERTICAL CURVE
22322,523578	948,561805	-0,013308	576,314061	- GRADE
22898,837639	940,892347	-0,013308	50,895193	2767,1 VERTICAL CURVE
22949,732832	940,683099	0,005085	119,953170	- GRADE
23069,686002	941,293068	0,005085	139,626147	-6279,6 VERTICAL CURVE
23209,312149	940,450797	-0,017150	75,729466	- GRADE
23285,041615	939,152057	-0,017150	119,480186	6991,2 VERTICAL CURVE
23404,521801	938,123962	-0,000060	246,298321	- GRADE
23650,820122	938,109253	-0,000060	27,655286	-2004,3 VERTICAL CURVE
23678,475408	937,916812	-0,013857	147,391940	- GRADE
23825,867348	935,874335	-0,013857	148,689463	3790,2 VERTICAL CURVE
23974,556811	936,730391	0,025372	206,916458	- GRADE
24181,473269	941,980306	0,025372	333,463938	-5508,2 VERTICAL CURVE
24514,937207	940,347046	-0,035168	71,590838	- GRADE
24586,528045	937,829350	-0,035168	163,709195	5107,1 VERTICAL CURVE

24750,237240	934,695909	-0,003113	261,877823	-	GRADE
25012,115063	933,880758	-0,003113	15,995187	1126,0	VERTICAL CURVE
25028,110250	933,944581	0,011093	209,763875	-	GRADE
25237,874125	936,271474	0,011093	45,012154	-5228,8	VERTICAL CURVE
25282,886279	936,577046	0,002484	43,062918	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.9 RECONSTRUCCIÓN M-607: GNSS LEICA

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Ascendente - GPS Leica

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 607
 Longitud (m) : 12224.74
 Separación media (m) : 20.17
 Altitud máxima (m) : 929.19
 Altitud media (m) : 885.45
 Altitud mínima (m) : 835.39
 Pendiente media : 0.001

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 6.5E-5
 Kv límite : 15385
 Rectas Interpolación (Puntos) : 5
 Rectas Interpolación (m) : 80.69

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.394479
 Valor absoluto del Error (varianza) : 0.202087
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.449541
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.440107
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 2.446502

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 66
 Grades : 21
 Vertical curves : 45
 Cuasi grades : 0
 Short alignments (L<50.00 m) : 3
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	898,660000	-0,020999	96,447736	-6999,7	VERTICAL CURVE
96,447736	895,970212	-0,034778	60,300183	-	GRADE
156,747919	893,873092	-0,034778	82,018996	4136,8	VERTICAL CURVE
238,766915	891,833725	-0,014951	60,935752	8473,8	VERTICAL CURVE
299,702667	891,141763	-0,007760	228,577143	-	GRADE
528,279810	889,367988	-0,007760	147,820283	-4384,0	VERTICAL CURVE
676,100093	885,728783	-0,041478	141,386729	-11771,6	VERTICAL CURVE
817,486822	879,015234	-0,053489	262,506372	6609,4	VERTICAL CURVE
1079,993194	870,187047	-0,013772	126,521905	5709,2	VERTICAL CURVE
1206,515099	869,846556	0,008389	61,381848	-	GRADE
1267,896947	870,361515	0,008389	80,524452	-5641,9	VERTICAL CURVE
1348,421399	870,462427	-0,005883	898,352529	-	GRADE
2246,773928	865,177388	-0,005883	38,820507	-4395,5	VERTICAL CURVE
2285,594435	864,777576	-0,014715	195,663497	-9652,1	VERTICAL CURVE
2481,257932	859,915204	-0,034986	186,201432	-	GRADE
2667,459364	853,400679	-0,034986	155,255698	-5171,2	VERTICAL CURVE
2822,715062	845,638225	-0,065009	333,932971	4851,7	VERTICAL CURVE
3156,648033	835,421380	0,003818	71,054716	5164,8	VERTICAL CURVE

3227,702749	836,181459	0,017576	160,585395	5187,4	VERTICAL CURVE
3388,288144	841,489519	0,048533	64,567279	-	GRADE
3452,855423	844,623162	0,048533	102,599604	-6973,7	VERTICAL CURVE
3555,455027	848,847882	0,033821	79,058634	-11678,4	VERTICAL CURVE
3634,513661	851,254088	0,027051	58,151529	-10392,0	VERTICAL CURVE
3692,665190	852,664436	0,021455	651,699090	-	GRADE
4344,364280	866,646691	0,021455	155,493284	-4623,0	VERTICAL CURVE
4499,857564	867,367810	-0,012180	184,168055	-	GRADE
4684,025619	865,124674	-0,012180	141,106209	8233,3	VERTICAL CURVE
4825,131828	864,615191	0,004959	196,468963	-	GRADE
5021,600791	865,589395	0,004959	175,899758	4784,0	VERTICAL CURVE
5197,500549	869,695390	0,041727	117,898957	-5944,4	VERTICAL CURVE
5315,399506	873,445784	0,021893	89,038458	-6688,1	VERTICAL CURVE
5404,437964	874,802455	0,008580	56,155461	-3506,8	VERTICAL CURVE
5460,593425	874,834676	-0,007433	78,802039	-6785,1	VERTICAL CURVE
5539,395464	873,791355	-0,019047	61,962854	-7470,7	VERTICAL CURVE
5601,358318	872,354201	-0,027341	162,220466	-	GRADE
5763,578784	867,918954	-0,027341	80,699082	5577,8	VERTICAL CURVE
5844,277866	866,296347	-0,012873	60,518082	2352,9	VERTICAL CURVE
5904,795948	866,295578	0,012848	219,403991	-	GRADE
6124,199939	869,114371	0,012848	79,688464	-4944,1	VERTICAL CURVE
6203,888403	869,495961	-0,003270	118,437058	-	GRADE
6322,325461	869,108617	-0,003270	209,821232	8390,0	VERTICAL CURVE
6532,146693	871,046067	0,021738	54,770605	-5276,8	VERTICAL CURVE
6586,917298	871,952430	0,011359	129,592013	-7584,7	VERTICAL CURVE
6716,509311	872,317304	-0,005727	79,015972	-	GRADE
6795,525283	871,864741	-0,005727	82,151406	5416,8	VERTICAL CURVE
6877,676689	872,017175	0,009439	1111,463022	-	GRADE
7989,139711	882,507774	0,009439	122,759122	5859,9	VERTICAL CURVE
8111,898833	884,952281	0,030388	79,358020	5204,6	VERTICAL CURVE
8191,256853	887,968782	0,045635	426,774381	-	GRADE
8618,031234	907,444658	0,045635	61,482656	-5935,4	VERTICAL CURVE
8679,513890	909,931984	0,035276	169,387096	-5729,8	VERTICAL CURVE
8848,900986	913,403597	0,005714	224,762153	-	GRADE
9073,663139	914,687867	0,005714	189,404516	-10783,7	VERTICAL CURVE
9263,067655	914,106760	-0,011850	171,322021	-	GRADE
9434,389676	912,076584	-0,011850	87,033924	5910,1	VERTICAL CURVE
9521,423600	911,686068	0,002876	587,366394	-	GRADE
10108,789994	913,375429	0,002876	40,188310	2965,5	VERTICAL CURVE
10148,978304	913,763332	0,016428	453,940260	-	GRADE
10602,918564	921,220693	0,016428	38,220910	-4064,0	VERTICAL CURVE
10641,139474	921,668859	0,007023	251,516388	-	GRADE
10892,655862	923,435329	0,007023	210,223989	10033,0	VERTICAL CURVE
11102,879851	927,114232	0,027977	227,321396	-4791,9	VERTICAL CURVE
11330,201247	928,082008	-0,019462	432,492485	-	GRADE
11762,693732	919,664860	-0,019462	172,393078	-6360,3	VERTICAL CURVE
11935,086810	913,973452	-0,046566	117,327304	4661,4	VERTICAL CURVE
12052,414114	909,986527	-0,021396	172,326158	3139,7	VERTICAL CURVE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Descendente - GPS Leica

Tramo : Trazas completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 661

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

Longitud (m) : 12238.93
 Separación media (m) : 18.54
 Altitud máxima (m) : 929.54
 Altitud media (m) : 885.57
 Altitud mínima (m) : 834.91
 Pendiente media : -0.0011

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 3.5E-5
 Kv límite : 28571
 Rectas Interpolación (Puntos) : 6
 Rectas Interpolación (m) : 92.72

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.180948
 Valor absoluto del Error (varianza) : 0.078667
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.280476
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.320672
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 1.2449

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 72
 Grades : 20
 Vertical curves : 52
 Cuasi grades : 0
 Short alignments (L<50.00 m) : 4
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	911,280000	-0,018241	141,534497	6667,3	VERTICAL CURVE
141,534497	910,200585	0,002988	158,747353	4094,0	VERTICAL CURVE
300,281850	913,752639	0,041763	112,943248	-	GRADE
413,225098	918,469541	0,041763	74,961887	-5584,4	VERTICAL CURVE
488,186985	921,097089	0,028340	46,704617	-4377,4	VERTICAL CURVE
534,891602	922,171546	0,017671	356,378982	-	GRADE
891,270584	928,468995	0,017671	69,982666	-5684,2	VERTICAL CURVE
961,253250	929,274828	0,005359	206,311063	-5938,5	VERTICAL CURVE
1167,564313	926,796681	-0,029382	197,018045	8938,7	VERTICAL CURVE
1364,582358	923,179089	-0,007341	254,966113	-	GRADE
1619,548471	921,307325	-0,007341	34,544078	-3479,4	VERTICAL CURVE
1654,092549	920,882250	-0,017269	395,218480	-	GRADE
2049,311029	914,057090	-0,017269	116,293340	8235,9	VERTICAL CURVE
2165,604369	912,869825	-0,003149	493,744429	-	GRADE
2659,348798	911,314968	-0,003149	188,895703	13114,8	VERTICAL CURVE
2848,244501	912,080467	0,011254	147,398546	-	GRADE
2995,643047	913,739305	0,011254	93,787973	-10757,6	VERTICAL CURVE
3089,431020	914,385970	0,002536	77,390081	-8682,4	VERTICAL CURVE
3166,821101	914,237314	-0,006378	242,648897	-	GRADE
3409,469998	912,689805	-0,006378	119,894736	-4894,6	VERTICAL CURVE
3529,364734	910,456739	-0,030873	100,518631	-7072,6	VERTICAL CURVE
3629,883365	906,639132	-0,045085	406,495447	-	GRADE
4036,378812	888,312145	-0,045085	82,852168	8081,4	VERTICAL CURVE
4119,230980	885,001435	-0,034833	140,418290	4702,8	VERTICAL CURVE
4259,649270	882,206561	-0,004975	497,822439	-	GRADE
4757,471709	879,730036	-0,004975	129,410027	-15248,1	VERTICAL CURVE
4886,881736	878,537108	-0,013462	491,915473	-	GRADE
5378,797209	871,915094	-0,013462	76,608571	3202,1	VERTICAL CURVE
5455,405780	871,800227	0,010463	294,381423	-9479,1	VERTICAL CURVE

5749,787203	870,309187	-0,020593	96,802902	7070,1 VERTICAL CURVE
5846,590105	868,978440	-0,006901	77,445546	6957,3 VERTICAL CURVE
5924,035651	868,875028	0,004231	221,311389	-14415,5 VERTICAL CURVE
6145,347040	868,112468	-0,011122	167,250149	- GRADE
6312,597189	866,252344	-0,011122	156,505822	4217,5 VERTICAL CURVE
6469,103011	867,415569	0,025987	182,935801	- GRADE
6652,038812	872,169477	0,025987	52,291987	-5893,8 VERTICAL CURVE
6704,330799	873,296398	0,017114	51,839102	-7103,4 VERTICAL CURVE
6756,169901	873,994435	0,009817	69,565069	-4639,6 VERTICAL CURVE
6825,734970	874,155803	-0,005177	53,374381	-6306,3 VERTICAL CURVE
6879,109351	873,653598	-0,013641	54,984444	-5871,9 VERTICAL CURVE
6934,093795	872,646119	-0,023005	92,855344	-5070,1 VERTICAL CURVE
7026,949139	869,659691	-0,041319	128,998154	5585,6 VERTICAL CURVE
7155,947293	865,819157	-0,018225	91,570670	6015,6 VERTICAL CURVE
7247,517963	864,847265	-0,003002	193,632306	- GRADE
7441,150269	864,265897	-0,003002	183,887937	10671,4 VERTICAL CURVE
7625,038206	865,298149	0,014229	97,550937	- GRADE
7722,589143	866,686240	0,014229	55,981970	-4407,7 VERTICAL CURVE
7778,571113	867,127320	0,001529	182,395158	-7630,5 VERTICAL CURVE
7960,966271	865,226183	-0,022375	599,373297	- GRADE
8560,339568	851,815288	-0,022375	37,423327	-11970,5 VERTICAL CURVE
8597,762895	850,919448	-0,025501	112,650406	-9185,2 VERTICAL CURVE
8710,413301	847,355942	-0,037765	154,248799	-17133,7 VERTICAL CURVE
8864,662100	840,836340	-0,046768	119,131991	5526,1 VERTICAL CURVE
8983,794091	836,548895	-0,025210	122,895221	4803,4 VERTICAL CURVE
9106,689312	835,022837	0,000375	81,913924	4784,1 VERTICAL CURVE
9188,603236	835,754819	0,017497	78,975672	5144,9 VERTICAL CURVE
9267,578908	837,742815	0,032847	202,527686	6108,9 VERTICAL CURVE
9470,106594	847,752500	0,066000	50,906226	-2355,7 VERTICAL CURVE
9521,012820	850,562278	0,044390	88,213990	-8778,8 VERTICAL CURVE
9609,226810	854,034901	0,034342	92,774913	- GRADE
9702,001723	857,220941	0,034342	205,704740	-20505,9 VERTICAL CURVE
9907,706463	863,253409	0,024310	56,067806	-8190,8 VERTICAL CURVE
9963,774269	864,424525	0,017465	110,244039	-8922,2 VERTICAL CURVE
10074,018308	865,668827	0,005109	803,693613	- GRADE
10877,711921	869,774662	0,005109	41,201008	-4709,1 VERTICAL CURVE
10918,912929	869,804905	-0,003641	163,424900	- GRADE
11082,337829	869,209938	-0,003641	307,832983	5181,4 VERTICAL CURVE
11390,170812	877,233652	0,055771	219,648327	-9017,7 VERTICAL CURVE
11609,819139	886,808607	0,031413	142,019504	-5674,0 VERTICAL CURVE
11751,838643	889,492572	0,006384	216,742634	- GRADE
11968,581277	890,876180	0,006384	74,067468	3318,3 VERTICAL CURVE
12042,648745	892,175617	0,028704	196,276889	- GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Ascendente - GPS LEika - Eje promediado

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 606
Longitud (m) : 12204.65
Separación media (m) : 20.17
Altitud máxima (m) : 929.41
Altitud media (m) : 885.33
Altitud mínima (m) : 835.25

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

Pendiente media : 0.0011

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 5.0E-5
Kv límite : 20000
Rectas Interpolación (Puntos) : 7
Rectas Interpolación (m) : 121.04

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.349615
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.175991
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.419513
Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.418066
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 2.300327

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 61
Grades : 17
Vertical curves : 44
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 1
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K
0,000000	897,710000	-0,032862	131,149586	- GRADE
131,149586	893,400157	-0,032862	87,134622	4631,2 VERTICAL CURVE
218,284208	891,356449	-0,014047	115,287945	15207,6 VERTICAL CURVE
333,572153	890,173978	-0,006466	137,705798	- GRADE
471,277951	889,283545	-0,006466	144,408997	-5397,9 VERTICAL CURVE
615,686948	886,418084	-0,033219	221,131372	-10042,2 VERTICAL CURVE
836,818320	876,637597	-0,055239	224,077824	4798,0 VERTICAL CURVE
1060,896144	869,492155	-0,008537	144,680672	8583,1 VERTICAL CURVE
1205,576816	869,476425	0,008320	162,924152	-11723,6 VERTICAL CURVE
1368,500968	869,699789	-0,005578	799,149248	- GRADE
2167,650216	865,242463	-0,005578	56,973422	-9390,3 VERTICAL CURVE
2224,623638	864,751851	-0,011645	171,611291	-10150,1 VERTICAL CURVE
2396,234929	861,302706	-0,028552	67,127834	-10937,5 VERTICAL CURVE
2463,362763	859,180056	-0,034690	185,101893	- GRADE
2648,464656	852,758922	-0,034690	155,397350	-5102,2 VERTICAL CURVE
2803,862006	845,001763	-0,065147	400,499079	4809,1 VERTICAL CURVE
3204,361085	835,587180	0,018132	159,671615	5372,2 VERTICAL CURVE
3364,032700	840,855265	0,047854	150,288649	-17869,4 VERTICAL CURVE
3514,321349	847,415186	0,039444	96,459116	-5670,1 VERTICAL CURVE
3610,780465	850,399404	0,022432	654,247475	- GRADE
4265,027940	865,075279	0,022432	335,916588	-8183,1 VERTICAL CURVE
4600,944528	865,715771	-0,018618	203,435826	8604,4 VERTICAL CURVE
4804,380354	864,333089	0,005025	174,810792	- GRADE
4979,191146	865,211511	0,005025	92,115465	7530,5 VERTICAL CURVE
5071,306611	866,237780	0,017257	106,358609	4276,7 VERTICAL CURVE
5177,665220	869,395758	0,042126	114,644459	-5761,3 VERTICAL CURVE
5292,309679	873,084649	0,022227	89,425311	-6391,8 VERTICAL CURVE
5381,734990	874,446771	0,008237	54,214951	-4405,1 VERTICAL CURVE
5435,949941	874,559698	-0,004071	63,891990	-5524,9 VERTICAL CURVE
5499,841931	873,930173	-0,015635	76,000569	-6733,7 VERTICAL CURVE
5575,842500	872,312998	-0,026922	183,502826	- GRADE
5759,345326	867,372781	-0,026922	168,435721	4051,5 VERTICAL CURVE
5927,781047	866,339429	0,014652	153,124196	- GRADE

6080,905243	868,582968	0,014652	162,276595	-8168,8 VERTICAL CURVE
6243,181838	869,348750	-0,005214	57,946468	- GRADE
6301,128306	869,046631	-0,005214	116,116810	6118,7 VERTICAL CURVE
6417,245116	869,543021	0,013764	94,649519	14831,9 VERTICAL CURVE
6511,894635	871,147744	0,020145	182,968617	-6737,7 VERTICAL CURVE
6694,863252	872,349318	-0,007011	206,266237	12627,6 VERTICAL CURVE
6901,129489	872,587846	0,009324	1065,811206	- GRADE
7966,940695	882,525168	0,009324	142,032057	4262,7 VERTICAL CURVE
8108,972752	886,215673	0,042643	487,491176	- GRADE
8596,463928	907,003999	0,042643	142,793279	-7658,8 VERTICAL CURVE
8739,257207	911,762061	0,023999	92,669699	-5027,7 VERTICAL CURVE
8831,926906	913,132016	0,005567	223,628305	- GRADE
9055,555211	914,377006	0,005567	189,003343	-10801,3 VERTICAL CURVE
9244,558554	913,775615	-0,011931	126,468415	- GRADE
9371,026969	912,266715	-0,011931	153,171544	10603,1 VERTICAL CURVE
9524,198513	911,545572	0,002515	539,325113	- GRADE
10063,523626	912,901918	0,002515	88,659527	6120,0 VERTICAL CURVE
10152,183153	913,767089	0,017002	395,415127	- GRADE
10547,598280	920,489860	0,017002	36,409709	-10602,9 VERTICAL CURVE
10584,007989	921,046377	0,013568	54,899539	-9950,3 VERTICAL CURVE
10638,907528	921,639795	0,008050	314,986192	- GRADE
10953,893720	924,175582	0,008050	106,765746	3948,0 VERTICAL CURVE
11060,659466	926,478716	0,035093	149,561761	-4451,0 VERTICAL CURVE
11210,221227	929,214573	0,001492	101,556536	-5398,4 VERTICAL CURVE
11311,777763	928,410816	-0,017321	329,908470	- GRADE
11641,686233	922,696629	-0,017321	251,391507	-8956,2 VERTICAL CURVE
11893,077740	914,814242	-0,045390	157,957269	4849,4 VERTICAL CURVE
12051,035009	910,217194	-0,012817	153,614361	4259,7 VERTICAL CURVE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.10 RECONSTRUCCIÓN M-607: GNSS GARMIN

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Ascendente - GPS Garmin - Traza completa

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 654
 Longitud (m) : 12285.47
 Separación media (m) : 18.81
 Altitud máxima (m) : 946.91
 Altitud media (m) : 903.76
 Altitud mínima (m) : 852.9
 Pendiente media : -0.0008

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 1.5E-5
 Kv límite : 66667
 Rectas Interpolación (Puntos) : 14
 Rectas Interpolación (m) : 244.58

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 5.949649
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 2.003247
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 7.89948
 Valor absoluto del Error (varianza) : 1.94576
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 1.394905

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 13
 Grades : 5
 Vertical curves : 8
 Cuasi grades : 0
 Short alignments (L<50.00 m) : 0
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K
0,000000	932,390000	-0,039709	1059,990802	- GRADE
1059,990802	890,298823	-0,039709	273,660825	7661,2 VERTICAL CURVE
1333,651627	884,319628	-0,003989	1108,785208	- GRADE
2442,436835	879,896849	-0,003989	348,261930	-8998,5 VERTICAL CURVE
2790,698765	871,768438	-0,042691	1215,164788	14851,1 VERTICAL CURVE
4005,863553	869,606296	0,039132	576,879063	-16599,9 VERTICAL CURVE
4582,742616	882,157105	0,004380	3369,038935	- GRADE
7951,781551	896,914728	0,004380	187,701516	13813,4 VERTICAL CURVE
8139,483067	899,012210	0,017969	300,205062	9110,3 VERTICAL CURVE
8439,688129	909,352744	0,050921	531,112412	-12321,7 VERTICAL CURVE
8970,800541	924,951022	0,007817	2194,568761	- GRADE
11165,369302	942,106164	0,007817	655,364885	-18288,7 VERTICAL CURVE
11820,734187	935,486898	-0,028017	464,738647	- GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Descendente - GPS Garmin - Traza completa
Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 487
Longitud (m) : 12290.69
Separación media (m) : 25.29
Altitud máxima (m) : 985.02
Altitud media (m) : 938.07
Altitud mínima (m) : 885.55
Pendiente media : -0.0015

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 1.5E-5
Kv límite : 66667
Rectas Interpolación (Puntos) : 14
Rectas Interpolación (m) : 328.76

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 1.147367
Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.854643
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 2.990918
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.419313
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.647544

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 23
Grades : 6
Vertical curves : 17
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 0
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	965,850000	-0,009444	401,560512	7579,5	VERTICAL CURVE
401,560512	972,695047	0,043536	427,088808	-10065,8	VERTICAL CURVE
828,649320	982,228252	0,001107	1156,857895	-53510,8	VERTICAL CURVE
1985,507215	971,003240	-0,020513	427,340787	18232,7	VERTICAL CURVE
2412,848002	967,245410	0,002926	727,018481	-	GRADE
3139,866483	969,372344	0,002926	103,851784	65699,7	VERTICAL CURVE
3243,718267	969,758248	0,004506	186,220261	-4856,4	VERTICAL CURVE
3429,938528	967,027099	-0,033839	741,677369	-	GRADE
4171,615897	941,929690	-0,033839	158,113222	6459,1	VERTICAL CURVE
4329,729119	938,514577	-0,009360	1954,265838	-	GRADE
6283,994957	920,223426	-0,009360	494,279378	15823,7	VERTICAL CURVE
6778,274335	923,316967	0,021877	294,078162	-5244,1	VERTICAL CURVE
7072,352497	921,504922	-0,034201	549,376730	10496,3	VERTICAL CURVE
7621,729227	917,093099	0,018139	271,279492	-9218,4	VERTICAL CURVE
7893,008719	918,022306	-0,011289	97,407414	-6146,6	VERTICAL CURVE
7990,416133	916,150867	-0,027136	1034,250829	-	GRADE
9024,666962	888,085278	-0,027136	420,731112	4931,0	VERTICAL CURVE
9445,398074	894,617601	0,058188	440,399182	-12314,8	VERTICAL CURVE

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

9885,797256	912,369024	0,022427	304,938438	-15059,2	VERTICAL CURVE
10190,735694	916,120416	0,002178	775,622302	-	GRADE
10966,357996	917,809337	0,002178	559,597889	12621,7	VERTICAL CURVE
11525,955885	931,433068	0,046514	97,659631	-3482,2	VERTICAL CURVE
11623,615516	934,606141	0,018469	667,078547	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Ascendente - GPS Garmin - Eje promediado 2 trazas

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 653
Longitud (m) : 12264.26
Separación media (m) : 18.81
Altitud máxima (m) : 966.89
Altitud media (m) : 921.89
Altitud mínima (m) : 869.51
Pendiente media : 0.0008

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 1.75E-5
Kv límite : 57143
Rectas Interpolación (Puntos) : 9
Rectas Interpolación (m) : 150.48

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 5.158559
Valor absoluto del Error (media) (m) : 1.556488
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 8.490943
Valor absoluto del Error (varianza) : 2.751728
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 1.658833

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 23
Grades : 7
Vertical curves : 16
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 0
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	938,635000	-0,032852	319,645387	-	GRADE
319,645387	928,133979	-0,032852	201,006416	10590,4	VERTICAL CURVE
520,651803	923,438057	-0,013872	391,459671	-10049,6	VERTICAL CURVE
912,111474	910,383495	-0,052825	272,573466	5494,5	VERTICAL CURVE
1184,684940	902,745875	-0,003216	1034,127943	-	GRADE
2218,812883	899,420139	-0,003216	457,389396	-13019,4	VERTICAL CURVE
2676,202279	889,914821	-0,038347	140,733799	-5157,3	VERTICAL CURVE
2816,936078	882,597866	-0,065636	539,586901	5335,4	VERTICAL CURVE
3356,522979	874,466761	0,035497	1259,856144	-43625,1	VERTICAL CURVE
4616,379123	900,996440	0,006618	977,952154	-	GRADE
5594,331277	907,468661	0,006618	93,446142	-3120,3	VERTICAL CURVE

5687,777419	906,687845	-0,023330	452,248949	13911,5 VERTICAL CURVE
6140,026368	903,488084	0,009179	1758,700665	- GRADE
7898,727033	919,631676	0,009179	328,496513	14472,5 VERTICAL CURVE
8227,223546	926,375132	0,031877	223,613457	49358,8 VERTICAL CURVE
8450,837003	934,009831	0,036408	380,140463	- GRADE
8830,977466	947,849825	0,036408	135,737827	-3578,9 VERTICAL CURVE
8966,715293	950,217660	-0,001519	102,404947	25893,7 VERTICAL CURVE
9069,120240	950,264583	0,002436	1176,047661	- GRADE
10245,167901	953,128979	0,002436	408,638542	18118,2 VERTICAL CURVE
10653,806443	958,732493	0,024990	254,985474	-9692,1 VERTICAL CURVE
10908,791917	961,750352	-0,001319	139,901533	-14903,3 VERTICAL CURVE
11048,693450	960,909199	-0,010706	1215,571529	- GRADE

 SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.11 RECONSTRUCCIÓN M-607: TELÉFONO MÓVIL + ROADRECORDER

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Ascendente - RoadRecorder - Traza completa
Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 498
Longitud (m) : 12019.71
Separación media (m) : 24.18
Altitud máxima (m) : 1003.98
Altitud media (m) : 958.45
Altitud mínima (m) : 911.48
Pendiente media : 0.0009

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 6.0E-5
Kv límite : 16667
Rectas Interpolación (Puntos) : 3
Rectas Interpolación (m) : 48.37

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 3.61343
Valor absoluto del Error (varianza) : 1.91249
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 1.382928
Valor absoluto del Error (media) (m) : 1.309764
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 8.318113

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 39
Grades : 13
Vertical curves : 26
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 2
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K
0,000000	971,190000	-0,033898	107,487600	- GRADE
107,487600	967,546349	-0,033898	67,268213	7488,2 VERTICAL CURVE
174,755813	965,568212	-0,024915	551,717838	- GRADE
726,473651	951,822110	-0,024915	48,482458	-1703,3 VERTICAL CURVE
774,956109	949,924174	-0,053379	71,289220	- GRADE
846,245329	946,118853	-0,053379	121,587964	1958,8 VERTICAL CURVE
967,833293	943,402374	0,008695	326,063141	-8448,3 VERTICAL CURVE
1293,896434	939,945335	-0,029900	110,688357	2475,2 VERTICAL CURVE
1404,584791	939,110659	0,014818	91,360705	- GRADE
1495,945496	940,464482	0,014818	116,363667	-5036,2 VERTICAL CURVE
1612,309163	940,844497	-0,008287	786,492591	- GRADE
2398,801754	934,326891	-0,008287	50,639373	-1528,9 VERTICAL CURVE
2449,441127	933,068629	-0,041408	485,565096	- GRADE
2935,006223	912,962296	-0,041408	263,093015	3430,0 VERTICAL CURVE
3198,099238	912,158210	0,035296	73,125562	-2629,5 VERTICAL CURVE
3271,224800	913,722417	0,007486	88,364516	1304,6 VERTICAL CURVE

3359,589316	917,376577	0,075221	214,237689	-4117,4 VERTICAL CURVE
3573,827005	927,917992	0,023188	401,337097	- GRADE
3975,164102	937,224166	0,023188	190,425089	-8029,5 VERTICAL CURVE
4165,589191	939,381686	-0,000528	1975,888789	- GRADE
6141,477980	938,338641	-0,000528	196,442590	6072,9 VERTICAL CURVE
6337,920570	941,412132	0,031819	143,913675	-5425,9 VERTICAL CURVE
6481,834245	944,082837	0,005296	1006,566101	- GRADE
7488,400346	949,413625	0,005296	139,629608	5303,4 VERTICAL CURVE
7628,029954	951,991220	0,031624	240,926728	-7270,8 VERTICAL CURVE
7868,956682	955,618713	-0,001512	156,493355	2984,5 VERTICAL CURVE
8025,450037	959,485117	0,050925	145,522921	- GRADE
8170,972958	966,895816	0,050925	48,592006	-1914,3 VERTICAL CURVE
8219,564964	968,753612	0,025540	957,097216	- GRADE
9176,662180	993,198330	0,025540	327,584604	-4382,4 VERTICAL CURVE
9504,246784	989,321451	-0,049210	97,132754	1532,3 VERTICAL CURVE
9601,379538	987,620270	0,014182	379,119159	-5111,8 VERTICAL CURVE
9980,498697	978,938071	-0,059984	255,171308	1695,2 VERTICAL CURVE
10235,670005	982,837108	0,090544	278,546795	-3595,9 VERTICAL CURVE
10514,216800	997,269429	0,013082	512,949488	- GRADE
11027,166288	1003,979705	0,013082	75,257106	-6843,2 VERTICAL CURVE
11102,423394	1004,550386	0,002084	50,173120	-2782,3 VERTICAL CURVE
11152,596514	1004,202580	-0,015949	126,773074	-11703,9 VERTICAL CURVE
11279,369588	1001,494137	-0,026780	740,344984	- GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Descendente - RoadRecorder - Traza completa

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 558
Longitud (m) : 12023.27
Separación media (m) : 21.59
Altitud máxima (m) : 1004.11
Altitud media (m) : 959.7
Altitud mínima (m) : 910.63
Pendiente media : -0.002

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 8.0E-5
Kv límite : 12500
Rectas Interpolación (Puntos) : 3
Rectas Interpolación (m) : 43.17

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 1.716367
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.764676
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.874458
Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.977124
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 6.07147

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 47
Grades : 14
Vertical curves : 33
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 1

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

Two consecutive grades

: 0

SE	ZE	PE	L	K
0,000000	987,410000	0,003824	417,405249	- GRADE
417,405249	989,006140	0,003824	188,502372	7103,2 VERTICAL CURVE
605,907621	992,228183	0,030362	58,675612	-7368,2 VERTICAL CURVE
664,583233	993,776049	0,022398	78,356099	7001,0 VERTICAL CURVE
742,939332	995,969584	0,033591	136,633989	-7542,1 VERTICAL CURVE
879,573321	999,321550	0,015474	274,372330	- GRADE
1153,945651	1003,567292	0,015474	103,402516	-3427,2 VERTICAL CURVE
1257,348167	1003,607498	-0,014697	1181,772272	- GRADE
2439,120439	986,239312	-0,014697	66,079461	5234,3 VERTICAL CURVE
2505,199900	985,685267	-0,002072	197,055626	- GRADE
2702,255526	985,276909	-0,002072	64,204890	-1664,9 VERTICAL CURVE
2766,460416	983,905878	-0,040636	178,533795	3345,3 VERTICAL CURVE
2944,994211	981,415050	0,012733	600,059304	- GRADE
3545,053515	989,055322	0,012733	181,571729	-2613,7 VERTICAL CURVE
3726,625244	985,060283	-0,056738	140,183694	-8788,4 VERTICAL CURVE
3866,808938	975,988558	-0,072689	118,345683	3848,8 VERTICAL CURVE
3985,154621	969,205645	-0,041940	48,074796	-3960,0 VERTICAL CURVE
4033,229417	966,897562	-0,054080	423,056785	5539,8 VERTICAL CURVE
4456,286202	960,172264	0,022287	139,792964	-4330,5 VERTICAL CURVE
4596,079166	961,031424	-0,009995	67,123720	-5146,0 VERTICAL CURVE
4663,202886	959,922773	-0,023038	655,222316	- GRADE
5318,425202	944,827442	-0,023038	143,277313	6892,8 VERTICAL CURVE
5461,702515	943,015665	-0,002252	1045,876521	- GRADE
6507,579036	940,660345	-0,002252	160,865952	4748,5 VERTICAL CURVE
6668,444988	943,022919	0,031625	505,664725	-7881,8 VERTICAL CURVE
7174,109713	942,793888	-0,032531	209,975881	- GRADE
7384,085594	935,963148	-0,032531	161,808497	4149,1 VERTICAL CURVE
7545,894091	933,854473	0,006467	183,084513	5645,7 VERTICAL CURVE
7728,978604	938,007173	0,038897	151,694454	-2072,2 VERTICAL CURVE
7880,673058	938,355070	-0,034310	90,084131	2311,5 VERTICAL CURVE
7970,757189	937,019669	0,004662	157,136448	-10297,8 VERTICAL CURVE
8127,893637	936,553319	-0,010597	88,119738	-1880,1 VERTICAL CURVE
8216,013375	933,554428	-0,057467	90,904504	2089,2 VERTICAL CURVE
8306,917879	930,308199	-0,013954	467,199011	- GRADE
8774,116890	923,788882	-0,013954	137,724338	-3421,5 VERTICAL CURVE
8911,841228	919,095202	-0,054206	210,554477	5328,6 VERTICAL CURVE
9122,395705	911,841712	-0,014692	70,367036	- GRADE
9192,762741	910,807847	-0,014692	125,361757	2834,1 VERTICAL CURVE
9318,124498	911,738605	0,029542	919,448347	- GRADE
10237,572845	938,900612	0,029542	79,171288	-3280,2 VERTICAL CURVE
10316,744133	940,284008	0,005405	939,864190	- GRADE
11256,608323	945,364232	0,005405	171,083110	6262,4 VERTICAL CURVE
11427,691433	948,625901	0,032724	83,315544	10025,9 VERTICAL CURVE
11511,006977	951,698526	0,041034	160,928059	- GRADE
11671,935036	958,302111	0,041034	62,254256	-1685,8 VERTICAL CURVE
11734,189292	959,707194	0,004106	123,449246	11475,5 VERTICAL CURVE
11857,638538	960,878062	0,014863	165,631769	- GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-607 Ascendente - RoadRecorder - Eje promediado 2 trazas

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 497
 Longitud (m) : 11997.17
 Separación media (m) : 24.19
 Altitud máxima (m) : 1003.13
 Altitud media (m) : 958.82
 Altitud mínima (m) : 912.99
 Pendiente media : 0.0014

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 3.25E-5
 Kv límite : 30769
 Rectas Interpolación (Puntos) : 7
 Rectas Interpolación (m) : 145.13

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 1.437126
 Valor absoluto del Error (varianza) : 0.754942
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.868874
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.829445
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 5.014553

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 41
 Grades : 12
 Vertical curves : 28
 Cuasi grades : 1
 Short alignments (L<50.00 m) : 1
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	967,110000	-0,022633	590,751196	-	GRADE
590,751196	953,739389	-0,022633	45,609195	-1272,3	VERTICAL CURVE
636,360391	951,889639	-0,058480	123,887675	2531,7	VERTICAL CURVE
760,248066	947,675896	-0,009545	1237,831240	-	GRADE
1998,079306	935,860273	-0,009545	325,416147	-14188,9	VERTICAL CURVE
2323,495453	929,022406	-0,032480	381,145620	-	GRADE
2704,641073	916,642818	-0,032480	153,599557	7791,3	VERTICAL CURVE
2858,240630	913,167968	-0,012766	222,634516	5865,0	VERTICAL CURVE
3080,875146	914,551515	0,025194	618,527379	-	GRADE
3699,402525	930,134998	0,025194	112,509188	7347,4	VERTICAL CURVE
3811,911713	933,831020	0,040507	123,028991	-4533,1	VERTICAL CURVE
3934,940704	937,145083	0,013367	253,146686	-	GRADE
4188,087390	940,528970	0,013367	103,184319	-2941,3	VERTICAL CURVE
4291,271709	940,098332	-0,021714	142,183726	-	GRADE
4433,455435	937,010918	-0,021714	118,073597	3289,8	VERTICAL CURVE
4551,529032	936,565927	0,014177	439,961261	-	GRADE
4991,490293	942,803136	0,014177	383,506864	-14594,2	VERTICAL CURVE
5374,997157	943,201112	-0,012101	187,381029	16254,1	VERTICAL CURVE
5562,378186	942,013650	-0,000573	138,784773	-10447,7	VERTICAL CURVE
5701,162959	941,012332	-0,013857	664,880168	19725,7	VERTICAL CURVE
6366,043127	943,004577	0,019850	169,831844	-8104,7	VERTICAL CURVE
6535,874971	944,596284	-0,001105	97,976996	-	GRADE
6633,851967	944,488015	-0,001105	122,148766	9905,2	VERTICAL CURVE
6756,000733	945,106188	0,011227	257,039274	11381,0	VERTICAL CURVE
7013,040007	950,894498	0,033812	95,972001	-3406,7	VERTICAL CURVE

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

7109,012008	952,787614	0,005640	407,114122	-	GRADE
7516,126130	955,083646	0,005640	115,125319	-23340,8	VERTICAL CURVE
7631,251449	955,449007	0,000707	340,197721	8713,4	VERTICAL CURVE
7971,449170	962,330824	0,039750	156,977990	6583,8	VERTICAL CURVE
8128,427160	970,442171	0,063593	392,738951	-7635,0	VERTICAL CURVE
8521,166111	985,316676	0,012154	93,773429	-9816,8	VERTICAL CURVE
8614,939540	986,008531	0,002602	461,047248	-	GRADE
9075,986788	987,208067	0,002602	132,023020	22645,6	VERTICAL CURVE
9208,009808	987,936404	0,008432	441,466602	-24038,5	VERTICAL CURVE
9649,476410	987,604961	-0,009933	177,036657	-	GRADE
9826,513067	985,846408	-0,009933	735,198001	14439,3	VERTICAL CURVE
10561,711068	997,260344	0,040983	163,940549	-4754,0	VERTICAL CURVE
10725,651617	1001,152410	0,006498	223,016748	-	GRADE
10948,668365	1002,601616	0,000821	152,951379	-14378,4	VERTICAL CURVE
11101,619744	1001,913718	-0,009816	76,713252	-6901,0	VERTICAL CURVE
11178,332996	1000,734297	-0,020933	818,832923	-	GRADE

 SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.12 RECONSTRUCCIÓN M-633: TELÉFONO MÓVIL + ROADRECORDER

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

m-633 - Ascendente - GPS RoadRecorder
Tramo : 0.0 - 6250.0

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 538
Longitud (m) : 6253.42
Separación media (m) : 11.65
Altitud máxima (m) : 1148.31
Altitud media (m) : 1055.75
Altitud mínima (m) : 976.06
Pendiente media : 0.0274

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 7.0E-5
Kv límite : 14286
Rectas Interpolación (Puntos) : 7
Rectas Interpolación (m) : 69.87

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.578115
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.215737
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.464475
Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.603764
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 2.182697

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 38
Grades : 10
Vertical curves : 28
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 7
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K
0,000000	976,060000	0,049467	486,662321	- GRADE
486,662321	1000,133519	0,049467	67,107319	-3041,1 VERTICAL CURVE
553,769640	1002,712657	0,027399	100,955277	- GRADE
654,724917	1005,478779	0,027399	92,331654	-3606,1 VERTICAL CURVE
747,056571	1006,826590	0,001796	376,863359	9655,9 VERTICAL CURVE
1123,919930	1014,857603	0,040825	429,371023	- GRADE
1553,290953	1032,386581	0,040825	167,182873	-3726,4 VERTICAL CURVE
1720,473826	1035,461511	-0,004040	234,877686	- GRADE
1955,351512	1034,512709	-0,004040	67,628512	3297,7 VERTICAL CURVE
2022,980024	1034,932982	0,016468	23,605014	- GRADE
2046,585038	1035,321720	0,016468	119,585090	3576,9 VERTICAL CURVE
2166,170128	1039,290096	0,049901	38,218319	-1668,1 VERTICAL CURVE
2204,388447	1040,759396	0,026989	230,451371	- GRADE
2434,839818	1046,979090	0,026989	123,206657	4409,1 VERTICAL CURVE
2558,046475	1052,025780	0,054933	333,936043	-4658,5 VERTICAL CURVE
2891,982518	1058,401242	-0,016749	47,393254	1600,1 VERTICAL CURVE

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

2939,375772	1058,309293	0,012869	215,322698	-9590,3	VERTICAL CURVE
3154,698470	1058,663100	-0,009583	108,341341	5706,0	VERTICAL CURVE
3263,039811	1058,653436	0,009405	113,077931	-	GRADE
3376,117742	1059,716879	0,009405	140,615170	2119,4	VERTICAL CURVE
3516,732912	1065,703864	0,075750	84,001798	-1745,4	VERTICAL CURVE
3600,734710	1070,045569	0,027622	36,299581	-960,7	VERTICAL CURVE
3637,034291	1070,362446	-0,010163	552,040663	-	GRADE
4189,074954	1064,752042	-0,010163	85,655276	3113,8	VERTICAL CURVE
4274,730230	1065,059644	0,017345	457,510974	-	GRADE
4732,241204	1072,995333	0,017345	160,481743	8447,4	VERTICAL CURVE
4892,722947	1077,303351	0,036343	104,660045	-8038,4	VERTICAL CURVE
4997,382992	1080,425697	0,023323	59,575598	4068,0	VERTICAL CURVE
5056,958590	1082,251436	0,037968	189,678907	-4009,8	VERTICAL CURVE
5246,637497	1084,966948	-0,009336	198,034539	4430,6	VERTICAL CURVE
5444,672036	1087,543942	0,035361	40,187691	1902,1	VERTICAL CURVE
5484,859727	1089,389576	0,056489	74,358390	2195,7	VERTICAL CURVE
5559,218117	1094,849147	0,090355	156,239999	-2811,8	VERTICAL CURVE
5715,458116	1104,625524	0,034790	31,964638	-1772,7	VERTICAL CURVE
5747,422754	1105,449389	0,016758	63,614689	634,5	VERTICAL CURVE
5811,037443	1109,704344	0,117014	59,666500	-1427,4	VERTICAL CURVE
5870,703943	1115,439113	0,075213	47,128134	4882,3	VERTICAL CURVE
5917,832077	1119,211221	0,084866	335,587631	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

m-633 - Descendente - GPS RoadRecorder
Tramo : 500.0 - 6400.0

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 487
Longitud (m) : 5908.61
Separación media (m) : 12.16
Altitud máxima (m) : 1141.74
Altitud media (m) : 1062.63
Altitud mínima (m) : 992.44
Pendiente media : -0.0252

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 3.5E-5
Kv límite : 28571
Rectas Interpolación (Puntos) : 20
Rectas Interpolación (m) : 230.99

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 1.607918
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.888661
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.942688
Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.850039
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 5.386111

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 28
Grades : 7
Vertical curves : 21
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 7
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
495,783868	1141,740000	-0,040735	335,458736	-10533,4	VERTICAL CURVE
831,242604	1122,733362	-0,072582	341,120877	-	GRADE
1172,363481	1097,974040	-0,072582	332,191446	5088,0	VERTICAL CURVE
1504,554927	1084,706986	-0,007294	24,919483	-1922,8	VERTICAL CURVE
1529,474410	1084,363752	-0,020254	24,735970	-	GRADE
1554,210380	1083,862755	-0,020254	162,564715	15976,9	VERTICAL CURVE
1716,775095	1081,397255	-0,010079	337,782579	-8029,6	VERTICAL CURVE
2054,557674	1070,888030	-0,052146	415,955964	4798,2	VERTICAL CURVE
2470,513638	1067,227343	0,034545	85,965854	-1985,6	VERTICAL CURVE
2556,479492	1068,336118	-0,008749	291,378293	-17370,5	VERTICAL CURVE
2847,857785	1063,343012	-0,025523	176,454194	5099,4	VERTICAL CURVE
3024,311979	1061,892239	0,009080	56,496664	24710,7	VERTICAL CURVE
3080,808643	1062,469796	0,011366	241,514758	-	GRADE
3322,323401	1065,214860	0,011366	24,217945	-1705,3	VERTICAL CURVE
3346,541346	1065,318151	-0,002836	241,234027	-	GRADE
3587,775373	1064,634032	-0,002836	37,119996	-2610,9	VERTICAL CURVE
3624,895369	1064,264893	-0,017053	471,439006	-	GRADE
4096,334375	1056,225432	-0,017053	90,526148	6412,7	VERTICAL CURVE
4186,860523	1055,320653	-0,002936	464,605589	-13505,5	VERTICAL CURVE
4651,466112	1045,964906	-0,037338	94,494287	3534,3	VERTICAL CURVE
4745,960399	1043,699920	-0,010601	49,030222	-	GRADE
4794,990621	1043,180129	-0,010601	49,330004	-1981,3	VERTICAL CURVE
4844,320625	1042,043055	-0,035499	221,666651	3205,7	VERTICAL CURVE
5065,987276	1041,838022	0,033649	43,780334	-544,3	VERTICAL CURVE
5109,767610	1041,550472	-0,046785	277,710345	25249,2	VERTICAL CURVE
5387,477955	1030,084939	-0,035787	613,851912	-	GRADE
6001,329867	1008,117290	-0,035787	153,041590	24500,4	VERTICAL CURVE
6154,371457	1003,118446	-0,029540	250,017548	-10341,6	VERTICAL CURVE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

m-633 - Ascendente - GPS RoadRecorder

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 521
 Longitud (m) : 6143.47
 Separación media (m) : 11.81
 Altitud máxima (m) : 1136.71
 Altitud media (m) : 1052.43
 Altitud mínima (m) : 975.89
 Pendiente media : 0.0263

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 3.5E-5
 Kv límite : 28571
 Rectas Interpolación (Puntos) : 18
 Rectas Interpolación (m) : 200.84

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 1.035607
 Valor absoluto del Error (varianza) : 0.474928

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.689151
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.752771
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 3.331004

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 19
 Grades : 5
 Vertical curves : 14
 Cuasi grades : 0
 Short alignments (L<50.00 m) : 1
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	975,890000	0,072452	754,689348	-10639,8	VERTICAL CURVE
754,689348	1003,803344	0,001521	422,384531	7568,3	VERTICAL CURVE
1177,073879	1016,232407	0,057331	138,031013	-6550,8	VERTICAL CURVE
1315,104892	1022,691624	0,036260	33,771903	5750,3	VERTICAL CURVE
1348,876795	1024,015362	0,042133	518,882939	-11755,8	VERTICAL CURVE
1867,759734	1034,426094	-0,002005	467,391127	11644,6	VERTICAL CURVE
2335,150861	1042,868848	0,038133	66,757689	-	GRADE
2401,908550	1045,414493	0,038133	185,014432	-6358,4	VERTICAL CURVE
2586,922982	1049,777834	0,009035	505,385752	-	GRADE
3092,308734	1054,343982	0,009035	67,624094	-14911,8	VERTICAL CURVE
3159,932828	1054,801629	0,004500	203,317149	4290,3	VERTICAL CURVE
3363,249977	1060,534202	0,051890	144,854551	-2551,4	VERTICAL CURVE
3508,104528	1063,938753	-0,004884	922,211550	-	GRADE
4430,316078	1059,434721	-0,004884	83,535749	1410,0	VERTICAL CURVE
4513,851827	1061,501330	0,054362	185,109508	-8356,0	VERTICAL CURVE
4698,961335	1069,513966	0,032209	184,731220	-	GRADE
4883,692555	1075,464061	0,032209	156,083091	-3813,3	VERTICAL CURVE
5039,775646	1077,297102	-0,008721	378,573973	4939,0	VERTICAL CURVE
5418,349619	1088,504312	0,067929	725,119075	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

m-633 - Descendente - GPS RoadRecorder
 Tramo : 500.0 - 6000.0

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 455
 Longitud (m) : 5502.25
 Separación media (m) : 12.12
 Altitud máxima (m) : 1121.45
 Altitud media (m) : 1055.22
 Altitud mínima (m) : 996.18
 Pendiente media : -0.0228

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 9.0E-5
 Kv límite : 11111
 Rectas Interpolación (Puntos) : 7
 Rectas Interpolación (m) : 72.72

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.901605

Valor absoluto del Error (varianza) : 0.414825
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.644069
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.699118
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 2.847988

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 40
 Grades : 10
 Vertical curves : 28
 Cuasi grades : 2
 Short alignments (L<50.00 m) : 6
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K
500,964897	1121,450000	-0,032007	173,104285	- GRADE
674,069182	1115,909515	-0,032007	136,969896	-1738,7 VERTICAL CURVE
811,039078	1106,130490	-0,110784	168,491838	2000,6 VERTICAL CURVE
979,530916	1094,559463	-0,026564	129,429784	-4316,5 VERTICAL CURVE
1108,960700	1089,180826	-0,056549	50,642013	- GRADE
1159,602713	1086,317078	-0,057713	199,101921	6761,8 VERTICAL CURVE
1358,704634	1077,757555	-0,028268	220,465951	- GRADE
1579,170585	1071,525392	-0,028268	165,714419	4584,6 VERTICAL CURVE
1744,885004	1069,835876	0,007877	238,996832	-3412,4 VERTICAL CURVE
1983,881836	1063,349074	-0,062161	38,190657	1259,8 VERTICAL CURVE
2022,072493	1061,553983	-0,031846	61,437861	1689,7 VERTICAL CURVE
2083,510354	1060,714384	0,004514	59,321837	- GRADE
2142,832191	1060,982171	0,004514	267,179341	-10091,2 VERTICAL CURVE
2410,011532	1058,651273	-0,021962	340,050702	4832,5 VERTICAL CURVE
2750,062234	1063,147219	0,048405	108,517589	-1382,4 VERTICAL CURVE
2858,579823	1064,140594	-0,030097	299,063487	- GRADE
3157,643310	1055,139676	-0,030097	176,098988	2975,5 VERTICAL CURVE
3333,742298	1055,050610	0,029085	314,323704	- GRADE
3648,066002	1064,192863	0,029085	125,659570	-1254,9 VERTICAL CURVE
3773,725572	1061,556147	-0,071051	177,843268	- GRADE
3951,568840	1048,920118	-0,071051	91,259719	4195,6 VERTICAL CURVE
4042,828559	1043,428477	-0,049300	113,028018	6506,5 VERTICAL CURVE
4155,856577	1038,837878	-0,031929	85,438857	3310,1 VERTICAL CURVE
4241,295434	1037,212560	-0,006117	37,659243	2115,3 VERTICAL CURVE
4278,954677	1037,317413	0,011686	113,482451	-4751,1 VERTICAL CURVE
4392,437128	1037,288253	-0,012200	88,316492	6265,3 VERTICAL CURVE
4480,753620	1036,833268	0,001896	258,579752	- GRADE
4739,333372	1037,323610	0,001896	53,161199	-1002,8 VERTICAL CURVE
4792,494571	1036,015352	-0,051115	88,587092	-2314,0 VERTICAL CURVE
4881,081663	1029,791546	-0,089398	22,086130	309,6 VERTICAL CURVE
4903,167793	1028,604796	-0,018068	237,662679	- GRADE
5140,830472	1024,310760	-0,018068	82,488196	-1472,9 VERTICAL CURVE
5223,318668	1020,510515	-0,074073	142,793053	8292,4 VERTICAL CURVE
5366,111721	1011,162896	-0,056853	97,843274	- GRADE
5463,954995	1005,600231	-0,059405	182,498006	2563,7 VERTICAL CURVE
5646,453001	1001,254589	0,011781	47,366692	- GRADE
5693,819693	1001,812604	0,011781	24,782749	-658,4 VERTICAL CURVE
5718,602442	1001,638138	-0,025860	100,614917	2081,4 VERTICAL CURVE
5819,217359	1001,468030	0,022479	49,282846	-816,2 VERTICAL CURVE
5868,500205	1001,088001	-0,037901	134,714377	- GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.13 RECONSTRUCCIÓN M-513: TELÉFONO MÓVIL + ROADRECORDER

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-513 Ascendente - RoadRecorder

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 421
 Longitud (m) : 8885.46
 Separación media (m) : 21.16
 Altitud máxima (m) : 755.14
 Altitud media (m) : 698.85
 Altitud mínima (m) : 644.75
 Pendiente media : -0.0059

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 2.5E-5
 Kv límite : 40000
 Rectas Interpolación (Puntos) : 11
 Rectas Interpolación (m) : 211.56

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 2.615662
 Valor absoluto del Error (varianza) : 1.061369
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 1.030228
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 1.249208
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 5.027489

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 22
 Grades : 3
 Vertical curves : 19
 Cuasi grades : 0
 Short alignments (L<50.00 m) : 0
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	742,120000	0,046807	510,163714	-8188,9	VERTICAL CURVE
510,163714	750,107619	-0,015493	124,085732	-3147,1	VERTICAL CURVE
634,249446	745,738896	-0,054922	86,084249	-16617,3	VERTICAL CURVE
720,333695	740,788011	-0,060102	201,235349	8212,7	VERTICAL CURVE
921,569044	731,158724	-0,035599	436,400022	4547,3	VERTICAL CURVE
1357,969066	736,563731	0,060370	599,256841	-5870,3	VERTICAL CURVE
1957,225907	742,154311	-0,041712	278,827832	8383,8	VERTICAL CURVE
2236,053739	735,160464	-0,008454	188,874516	-6921,3	VERTICAL CURVE
2424,928255	730,986620	-0,035743	651,835449	33020,2	VERTICAL CURVE
3076,763704	714,121904	-0,016002	252,537702	-	GRADE
3329,301406	710,080690	-0,016002	136,303134	-6325,1	VERTICAL CURVE
3465,604540	706,430871	-0,037552	277,772014	10685,6	VERTICAL CURVE
3743,376554	699,610306	-0,011557	304,337885	-6443,2	VERTICAL CURVE
4047,714439	688,905518	-0,058791	649,088444	-	GRADE
4696,802883	650,744971	-0,058791	348,718816	4069,1	VERTICAL CURVE
5045,521699	645,185859	0,026908	341,870420	30529,5	VERTICAL CURVE

5387,392119	656,299015	0,038106	191,662084	3691,3	VERTICAL CURVE
5579,054203	668,578241	0,090028	427,029165	-2561,0	VERTICAL CURVE
6006,083368	671,421296	-0,076713	201,119993	6905,2	VERTICAL CURVE
6207,203361	658,921725	-0,047587	232,269487	3653,1	VERTICAL CURVE
6439,472848	655,252823	0,015995	2175,895998	-	GRADE
8615,368846	690,056668	0,015995	270,088224	-8016,8	VERTICAL CURVE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-513 Descendente - RoadRecorder

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 471
 Longitud (m) : 8884.93
 Separación media (m) : 18.9
 Altitud máxima (m) : 751.75
 Altitud media (m) : 694.16
 Altitud mínima (m) : 641.24
 Pendiente media : 0.0062

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 3.0E-5
 Kv límite : 33333
 Rectas Interpolación (Puntos) : 11
 Rectas Interpolación (m) : 189.04

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 4.48073
 Valor absoluto del Error (varianza) : 1.731481
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 1.315857
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 1.660958
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 8.047881

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 18
 Grades : 5
 Vertical curves : 13
 Cuasi grades : 0
 Short alignments (L<50.00 m) : 0
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	696,320000	0,078039	350,640798	-2947,9	VERTICAL CURVE
350,640798	702,830011	-0,040907	377,481595	-	GRADE
728,122393	687,388513	-0,040907	386,573449	13912,2	VERTICAL CURVE
1114,695842	676,945908	-0,013120	1488,954805	-	GRADE
2603,650647	657,411007	-0,013120	434,544196	6801,0	VERTICAL CURVE
3038,194843	665,592198	0,050774	118,908312	3320,0	VERTICAL CURVE
3157,103155	673,759037	0,086590	327,388964	-1841,3	VERTICAL CURVE
3484,492119	673,002525	-0,091211	1194,314725	7335,4	VERTICAL CURVE
4678,806844	661,293573	0,071603	398,098974	-11051,9	VERTICAL CURVE
5076,905818	682,628867	0,035583	783,680238	-	GRADE
5860,586056	710,514220	0,035583	508,309581	-18843,6	VERTICAL CURVE

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

6368,895637	721,745317	0,008607	186,137210	4411,3	VERTICAL CURVE
6555,032847	727,274579	0,050803	179,241689	-5127,1	VERTICAL CURVE
6734,274536	733,247534	0,015844	483,736433	-	GRADE
7218,010969	740,911737	0,015844	841,308197	-14393,5	VERTICAL CURVE
8059,319166	729,653777	-0,042607	210,429096	1960,0	VERTICAL CURVE
8269,748262	731,984325	0,064757	226,452644	-5494,7	VERTICAL CURVE
8496,200906	741,982370	0,023544	388,731535	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-513 Ascendente - RoadRecorder
Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 477
Longitud (m) : 8842.81
Separación media (m) : 18.58
Altitud máxima (m) : 753.16
Altitud media (m) : 694.22
Altitud mínima (m) : 643.38
Pendiente media : -0.0068

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 3.0E-5
Kv límite : 33333
Rectas Interpolación (Puntos) : 14
Rectas Interpolación (m) : 241.51

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 1.353183
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.471554
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.686698
Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.940464
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 3.652322

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 30
Grades : 8
Vertical curves : 21
Cuasi grades : 1
Short alignments (L<50.00 m) : 1
Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	753,160000	-0,008090	404,636095	-11402,2	VERTICAL CURVE
404,636095	742,706546	-0,043578	295,955490	-	GRADE
700,591585	729,809385	-0,043578	323,056718	3464,8	VERTICAL CURVE
1023,648303	730,792179	0,049662	169,177992	-	GRADE
1192,826295	739,193962	0,049662	286,166397	-4230,5	VERTICAL CURVE
1478,992692	743,726913	-0,017982	592,871570	-	GRADE
2071,864262	733,065980	-0,017982	202,188785	12137,6	VERTICAL CURVE
2274,053047	731,114283	-0,001324	342,241351	-7811,5	VERTICAL CURVE
2616,294398	723,163975	-0,045136	120,196598	2771,3	VERTICAL CURVE
2736,490996	720,345288	-0,001765	177,001743	-4976,0	VERTICAL CURVE

2913,492739	716,884813	-0,037336	227,519383	-	GRADE
3141,012122	708,390113	-0,037336	41,702275	3387,7	VERTICAL CURVE
3182,714397	707,089787	-0,025026	576,116118	-	GRADE
3758,830515	692,671810	-0,025026	140,938282	-7053,8	VERTICAL CURVE
3899,768797	687,736650	-0,045007	59,664853	-	GRADE
3959,433650	685,051329	-0,045007	334,059880	-6679,0	VERTICAL CURVE
4293,493530	661,662145	-0,095023	140,844116	3055,8	VERTICAL CURVE
4434,337646	651,524549	-0,048932	178,006829	6906,9	VERTICAL CURVE
4612,344475	645,108202	-0,023159	133,280092	4074,1	VERTICAL CURVE
4745,624567	644,201578	0,009555	162,986993	17923,4	VERTICAL CURVE
4908,611560	646,499910	0,018648	579,215746	13050,5	VERTICAL CURVE
5487,827306	670,154746	0,063031	359,984170	-2551,1	VERTICAL CURVE
5847,811476	667,446680	-0,078076	367,921472	3995,5	VERTICAL CURVE
6215,732948	655,660714	0,014008	690,529051	-	GRADE
6906,261999	665,333909	0,014008	222,054435	-5628,3	VERTICAL CURVE
7128,316434	664,064191	-0,025444	62,888960	1483,3	VERTICAL CURVE
7191,205394	663,797173	0,016953	146,828382	-	GRADE
7338,033776	666,286320	0,012707	308,721784	9892,2	VERTICAL CURVE
7646,755560	675,026522	0,043915	343,164872	-10290,3	VERTICAL CURVE
7989,920432	684,374640	0,010567	852,887104	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-513 Descendente - RoadRecorder

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 499
Longitud (m) : 9023.38
Separación media (m) : 18.12
Altitud máxima (m) : 754.11
Altitud media (m) : 692.14
Altitud mínima (m) : 638.19
Pendiente media : 0.0066

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 1.0E-4
Kv límite : 10000
Rectas Interpolación (Puntos) : 6
Rectas Interpolación (m) : 90.6

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 6.770911
Valor absoluto del Error (varianza) : 2.887815
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 1.699357
Valor absoluto del Error (media) (m) : 1.977445
Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 9.077558

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 29
Grades : 7
Vertical curves : 22
Cuasi grades : 0
Short alignments (L<50.00 m) : 1
Two consecutive grades : 0

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

SE	ZE	PE	L	K
0,000000	695,180000	-0,011404	1040,658491	- GRADE
1040,658491	683,312539	-0,011404	111,225994	1744,1 VERTICAL CURVE
1151,884485	685,590832	0,052371	73,151640	-712,6 VERTICAL CURVE
1225,036125	685,667275	-0,050281	110,467643	3884,7 VERTICAL CURVE
1335,503768	681,683554	-0,021844	1444,091526	- GRADE
2779,595294	650,138947	-0,021844	499,158394	5007,4 VERTICAL CURVE
3278,753688	664,114681	0,077841	256,881669	-1871,4 VERTICAL CURVE
3535,635357	666,479548	-0,059429	194,583046	2398,5 VERTICAL CURVE
3730,218403	662,808628	0,021698	94,699766	- GRADE
3824,918169	664,863410	0,021698	75,041548	-642,9 VERTICAL CURVE
3899,959717	662,112385	-0,095018	212,723931	2918,3 VERTICAL CURVE
4112,683648	649,652963	-0,022124	171,865165	-3431,9 VERTICAL CURVE
4284,548813	641,547250	-0,072203	100,849819	1418,3 VERTICAL CURVE
4385,398632	637,851139	-0,001097	144,107690	2562,8 VERTICAL CURVE
4529,506322	641,744736	0,055134	974,336931	- GRADE
5503,843253	695,463841	0,055134	98,812492	-2148,2 VERTICAL CURVE
5602,655745	698,639229	0,009137	37,718596	630,0 VERTICAL CURVE
5640,374341	700,112986	0,069008	97,835009	-2182,3 VERTICAL CURVE
5738,209350	704,671384	0,024178	196,414045	3590,4 VERTICAL CURVE
5934,623395	714,792636	0,078883	59,398561	-1500,1 VERTICAL CURVE
5994,021956	718,302183	0,039287	98,665993	-2767,4 VERTICAL CURVE
6092,687949	720,419547	0,003633	935,294965	- GRADE
7027,982914	723,817674	0,003633	59,394599	3815,2 VERTICAL CURVE
7087,377513	724,495787	0,019201	79,254821	1696,8 VERTICAL CURVE
7166,632334	727,868505	0,065910	520,532114	-6435,4 VERTICAL CURVE
7687,164448	741,124890	-0,014976	301,898745	- GRADE
7989,063193	736,603710	-0,014976	135,592349	-2204,2 VERTICAL CURVE
8124,655542	730,402560	-0,076492	96,779014	886,5 VERTICAL CURVE
8221,434556	728,282268	0,032675	801,945884	- GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-513 - Eje promedio 2 trazas - RoadRecorder

Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 420
Longitud (m) : 8856.67
Separación media (m) : 21.14
Altitud máxima (m) : 753.38
Altitud media (m) : 698.84
Altitud mínima (m) : 644.46
Pendiente media : -0.0057

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 3.0E-5
Kv límite : 33333
Rectas Interpolación (Puntos) : 13
Rectas Interpolación (m) : 253.65

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 1.84872
Valor absoluto del Error (varianza) : 0.840511
Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.916794

Valor absoluto del Error (media) (m) : 1.006291
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 4.684294

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 27
 Grades : 7
 Vertical curves : 20
 Cuasi grades : 0
 Short alignments (L<50.00 m) : 2
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	746,385000	0,035230	433,508699	-6536,5	VERTICAL CURVE
433,508699	747,282176	-0,031091	205,667580	-11237,2	VERTICAL CURVE
639,176279	739,005694	-0,049393	633,162616	6718,2	VERTICAL CURVE
1272,338895	737,568044	0,044852	293,137336	-6485,5	VERTICAL CURVE
1565,476231	744,091143	-0,000347	107,356655	-	GRADE
1672,832886	744,053930	-0,000347	40,416655	-2713,0	VERTICAL CURVE
1713,249541	743,738867	-0,015244	84,867800	-	GRADE
1798,117341	742,445131	-0,015244	174,812814	-22176,3	VERTICAL CURVE
1972,930155	739,091248	-0,023127	1224,156221	-	GRADE
3197,086376	710,780175	-0,023127	136,475661	-7410,3	VERTICAL CURVE
3333,562037	706,367171	-0,041544	457,426428	25650,3	VERTICAL CURVE
3790,988465	691,442573	-0,023711	280,560730	-6932,1	VERTICAL CURVE
4071,549195	679,112730	-0,064184	119,624536	-	GRADE
4191,173731	671,434798	-0,064184	191,564906	11227,1	VERTICAL CURVE
4382,738637	660,773787	-0,047121	215,240144	-	GRADE
4597,978781	650,631490	-0,047121	242,649151	5122,6	VERTICAL CURVE
4840,627932	644,944630	0,000248	587,133200	7328,3	VERTICAL CURVE
5427,761132	668,610299	0,080367	492,021677	-3241,3	VERTICAL CURVE
5919,782809	670,808466	-0,071431	132,304080	4423,9	VERTICAL CURVE
6052,086889	663,336177	-0,041525	108,270097	4024,0	VERTICAL CURVE
6160,356986	660,296842	-0,014619	406,228213	13583,6	VERTICAL CURVE
6566,585199	660,432649	0,015287	1481,869484	-	GRADE
8048,454683	683,086368	0,015287	148,562958	14392,4	VERTICAL CURVE
8197,017641	686,124246	0,025610	150,847343	6822,6	VERTICAL CURVE
8347,864984	691,654994	0,047719	153,689489	-4165,3	VERTICAL CURVE
8501,554473	696,153595	0,010822	20,405178	-1829,7	VERTICAL CURVE
8521,959651	696,260638	-0,000330	334,710172	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-513 - Eje promedio 2 trazas - RoadRecorder
 Tramo : Traza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 492
 Longitud (m) : 9021.42
 Separación media (m) : 18.37
 Altitud máxima (m) : 753.29
 Altitud media (m) : 694.73
 Altitud mínima (m) : 642.76
 Pendiente media : -0.0065

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Apéndice C. Resultados de la reconstrucción de perfiles longitudinales

Pendiente límite : 2.0E-5
 Kv límite : 50000
 Rectas Interpolación (Puntos) : 10
 Rectas Interpolación (m) : 165.36

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 1.894092
 Valor absoluto del Error (varianza) : 0.746623
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.864073
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 1.074795
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 4.030577

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 19
 Grades : 4
 Vertical curves : 15
 Cuasi grades : 0
 Short alignments (L<50.00 m) : 1
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	751,135000	0,006728	698,813882	-11597,2	VERTICAL CURVE
698,813882	734,782485	-0,053529	205,636445	4359,3	VERTICAL CURVE
904,450327	728,625095	-0,006357	133,092786	2661,8	VERTICAL CURVE
1037,543113	731,106350	0,043643	627,970426	-13108,9	VERTICAL CURVE
1665,513539	743,471897	-0,004261	37,674803	-3204,7	VERTICAL CURVE
1703,188342	743,089917	-0,016017	78,950379	-4537,1	VERTICAL CURVE
1782,138721	741,138457	-0,033418	737,177426	27620,0	VERTICAL CURVE
2519,316147	726,341005	-0,006728	684,802528	-23083,4	VERTICAL CURVE
3204,118675	711,575727	-0,036395	685,184428	-	GRADE
3889,303103	686,638706	-0,036395	526,103231	-12055,3	VERTICAL CURVE
4415,406334	656,011563	-0,080036	470,626080	4238,2	VERTICAL CURVE
4886,032414	644,474697	0,031008	716,663694	-	GRADE
5602,696108	666,696873	0,031008	336,904236	-4039,0	VERTICAL CURVE
5939,600344	663,092451	-0,052405	441,003989	7592,9	VERTICAL CURVE
6380,604333	652,788515	0,005676	185,964665	14724,6	VERTICAL CURVE
6566,568998	655,018317	0,018305	1200,174888	-	GRADE
7766,743886	676,987804	0,018305	568,606360	-34723,2	VERTICAL CURVE
8335,350246	682,740701	0,001930	149,671752	10434,0	VERTICAL CURVE
8485,021998	684,103030	0,016274	536,396534	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-513 - Eje promedio 4 trazas - RoadRecorder
 Tramo : Taza completa

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 419
 Longitud (m) : 8848.08
 Separación media (m) : 21.17
 Altitud máxima (m) : 752.59
 Altitud media (m) : 697.26
 Altitud mínima (m) : 644.41
 Pendiente media : -0.0062

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 2.0E-5
 Kv límite : 50000
 Rectas Interpolación (Puntos) : 10
 Rectas Interpolación (m) : 190.51

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 1.376926
 Valor absoluto del Error (varianza) : 0.53311
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.730144
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.922174
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 3.061473

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 22
 Grades : 5
 Vertical curves : 16
 Cuasi grades : 1
 Short alignments (L<50.00 m) : 0
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
0,000000	748,667500	0,028896	326,545979	-6959,7	VERTICAL CURVE
326,545979	750,442580	-0,018024	96,944705	-3306,0	VERTICAL CURVE
423,490684	747,273870	-0,047348	268,006967	-	GRADE
691,497651	734,584388	-0,047348	73,489826	2957,9	VERTICAL CURVE
764,987477	732,017750	-0,022503	148,398225	-	GRADE
913,385702	728,678408	-0,019764	88,045991	1402,2	VERTICAL CURVE
1001,431693	729,702532	0,043027	882,534718	-13519,0	VERTICAL CURVE
1883,966411	738,869181	-0,022254	371,879183	-	GRADE
2255,845594	730,593495	-0,022254	327,916855	27469,0	VERTICAL CURVE
2583,762449	725,253420	-0,010316	164,590205	-8729,2	VERTICAL CURVE
2748,352654	722,003818	-0,029171	1014,860297	-	GRADE
3763,212951	692,399134	-0,029171	525,867653	-12676,6	VERTICAL CURVE
4289,080604	666,151542	-0,070655	287,592533	12250,1	VERTICAL CURVE
4576,673137	649,207671	-0,047178	362,977593	4271,4	VERTICAL CURVE
4939,650730	647,505780	0,037800	686,255757	-	GRADE
5625,906487	673,446545	0,037800	262,677052	-2541,6	VERTICAL CURVE
5888,583539	669,801846	-0,065551	614,763644	6598,8	VERTICAL CURVE
6503,347183	658,139959	0,027611	569,589449	-15428,4	VERTICAL CURVE
7072,936632	663,353052	-0,009307	75,062053	1307,6	VERTICAL CURVE
7147,998685	664,808996	0,048100	244,052429	-6527,7	VERTICAL CURVE
7392,051114	671,985613	0,010712	151,279639	31984,1	VERTICAL CURVE
7543,330753	673,963932	0,015442	1304,745682	-	GRADE

SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro

C.14 RECONSTRUCCIÓN M-325: GNSS TOPCON

RECONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL LONGITUDINAL

M-325 Ascendente - GPS Topcon

Tramo : 400.0 - 4126.0

DATOS DE LA TRAZA:

Número de puntos : 4102
 Longitud (m) : 3725.56
 Separación media (m) : 0.91
 Altitud máxima (m) : 665.71
 Altitud media (m) : 618.57
 Altitud mínima (m) : 586.87
 Pendiente media : 0.0205

PARÁMETROS USADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN:

Pendiente límite : 1.5E-5
 Kv límite : 66667
 Rectas Interpolación (Puntos) : 51
 Rectas Interpolación (m) : 45.42

RESULTADO: ERRORES

Error Cuadrático Medio ECM : 0.008427
 Valor absoluto del Error (varianza) : 0.005391
 Valor absoluto del Error (Desv. Típica) : 0.073425
 Valor absoluto del Error (media) (m) : 0.055134
 Valor absoluto del Error (máximo) (m) : 0.486954

RESULTADO: PERFIL LONGITUDINAL RECONSTRUIDO

Número Total de alineaciones : 30
 Grades : 11
 Vertical curves : 18
 Cuasi grades : 1
 Short alignments (L<50.00 m) : 7
 Two consecutive grades : 0

SE	ZE	PE	L	K	
400,384111	587,796000	-0,004315	157,120500	-	GRADE
557,504611	587,118095	-0,004315	92,669853	21324,0	VERTICAL CURVE
650,174464	586,919627	0,000031	346,178032	-	GRADE
996,352496	586,930441	0,000031	155,849760	17377,1	VERTICAL CURVE
1152,202256	587,634194	0,009000	147,163247	-	GRADE
1299,365503	588,958655	0,009000	68,270088	-5435,4	VERTICAL CURVE
1367,635591	589,144337	-0,003560	156,385603	33036,3	VERTICAL CURVE
1524,021194	588,957700	0,001173	150,173119	-46232,2	VERTICAL CURVE
1674,194313	588,890020	-0,002075	98,057908	2726,9	VERTICAL CURVE
1772,252221	590,449620	0,033885	248,753501	-	GRADE
2021,005722	598,878529	0,033885	27,712998	-13467,0	VERTICAL CURVE
2048,718720	599,789057	0,031827	146,915664	46050,8	VERTICAL CURVE
2195,634384	604,699256	0,035017	74,854227	-	GRADE
2270,488611	607,320430	0,034031	163,729796	52667,7	VERTICAL CURVE
2434,218407	613,146806	0,037140	49,945043	-	GRADE
2484,163450	615,001749	0,037140	19,644462	-5985,1	VERTICAL CURVE
2503,807912	615,699099	0,033857	32,074611	-	GRADE

2535,882523	616,785063	0,033857	35,208655	10863,2	VERTICAL CURVE
2571,091178	618,034195	0,037099	254,526865	29347,2	VERTICAL CURVE
2825,618043	628,580517	0,045771	404,300045	-	GRADE
3229,918088	647,085929	0,045771	118,142071	-34365,8	VERTICAL CURVE
3348,060159	652,290394	0,042334	56,912962	17752,5	VERTICAL CURVE
3404,973121	654,790959	0,045540	37,368604	-	GRADE
3442,341725	656,492711	0,045540	35,128705	-40354,7	VERTICAL CURVE
3477,470430	658,077169	0,044669	115,145421	-	GRADE
3592,615851	663,220613	0,044669	203,170416	-2573,4	VERTICAL CURVE
3795,786267	664,275957	-0,034280	65,909111	-	GRADE
3861,695378	662,016569	-0,034280	63,492702	2194,5	VERTICAL CURVE
3925,188080	660,758517	-0,005348	140,446038	3924,6	VERTICAL CURVE
4065,634118	662,520426	0,030438	60,305777	-	GRADE

 SE=Abscisa entrada; ZE=Cota entrada; PE=Pendiente entrada; L=Longitud; K=Parámetro