

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	27
1.1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	28
1.2	HIPÓTESIS	29
1.3	FASES DE LA INVESTIGACIÓN	30
1.4	ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	31
2	ESTADO DEL ARTE	33
2.1	LA VISIBILIDAD EN LAS PRINCIPALES MANIOBRAS DE LA CONDUCCIÓN.....	34
2.1.1	Distancia de parada y visibilidad de parada	35
2.1.2	Distancia de adelantamiento y visibilidad de adelantamiento	42
2.1.3	Distancia de cruce y visibilidad de cruce	47
2.1.4	Distancia de orientación y visibilidad de orientación	50
2.1.5	Distancia de decisión y visibilidad de decisión	51
2.1.6	Distancia de visibilidad nocturna	52
2.2	MODELOS DE CÁLCULO DE VISIBILIDADES.....	56
2.2.1	Modelos bidimensionales	57
2.2.2	Modelos tridimensionales.....	62
2.2.2.1	Modelos de elementos finitos.....	62
2.2.2.2	Modelos analíticos	67
2.3	LA TECNOLOGÍA LiDAR	70
2.3.1	Fundamentos de la tecnología LiDAR.....	70
2.3.1.1	El espectro electromagnético.....	70
2.3.1.2	El láser	72
2.3.1.3	Propiedades importantes de la luz láser	72
2.3.1.4	Mediciones usando la luz	73
2.3.1.5	Medición basada en tiempo.....	74
2.3.2	Sistemas LiDAR aéreo y LiDAR mobile.....	79
2.3.2.1	Sistemas LiDAR aéreo	80
2.3.2.2	Sistemas LiDAR mobile	81
2.3.3	Precisiones de los sistemas LiDAR.....	84
2.3.4	Modelos digitales del terreno y modelos digitales de superficies obtenidos a partir de datos LiDAR	92
2.4	LA TECNOLOGÍA LiDAR APLICADA A LA OBTENCIÓN DE VISIBILIDADES	98
2.4.1	Visibilidades obtenidas mediante modelos 3D generados a partir de datos LiDAR	99

2.4.2	Visibilidades obtenidas mediante secciones transversales generadas a partir de datos LiDAR	1066
2.4.3	Visibilidades obtenidas mediante algoritmos Ray-tracing aplicados directamente a la nube de puntos LiDAR.	106
2.5	LIMITACIONES DE LAS METODOLOGÍAS ACTUALES PARA LA ESTIMACIÓN DE VISIBILIDADES DISPONIBLES A PARTIR DE DATOS LIDAR	109
3	METODOLOGÍA PROPUESTA	111
3.1	INTRODUCCIÓN	112
3.2	METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA OBTENCIÓN DE VISIBILIDADES DISPONIBLES A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS LiDAR.....	112
3.2.1	Prisma visual (PV)	112
3.2.2	Unidades prismáticas rectangulares (UPR)	114
3.2.3	Transformación del problema tridimensional en un análisis bidimensional	114
3.2.4	Determinación del alcance de la visual	116
3.2.5	Análisis de muestras de diferente densidad de puntos LiDAR.....	119
3.2.6	Desarrollo de una aplicación informática de representación de visuales implementada en una herramienta de navegación tridimensional.....	119
4	DESARROLLO	121
4.1	INTRODUCCIÓN	122
4.2	TOMA DE DATOS LiDAR.....	122
4.2.1	Características de los tramos de carretera seleccionados para la investigación	122
4.2.2	Características de los equipos LiDAR Mobile empleados en la toma de datos.	125
4.2.3	Datos LiDAR aéreo. Proyecto PNOA-IGN.....	127
4.3	TRATAMIENTO DE DATOS LiDAR.....	128
4.3.1	Obtención de un modelo digital del terreno (MDT) a partir de datos LiDAR aéreo	128
4.3.2	Obtención de un modelo digital de superficies (MDS) a partir de datos LiDAR aéreo y LiDAR mobile	130
4.3.3	Obtención de perfiles teóricos de proyecto.....	133
4.3.4	Generación de nubes de puntos LiDAR de diferente densidad	134
4.4	GEOMETRÍA DE LAS CARRETERAS SOMETIDAS A ESTUDIO	137
4.5	OBTENCIÓN DE VISIBILIDADES	137
4.5.1	Visibilidades obtenidas a partir de la metodología de prisma visual.....	139
4.5.2	Visibilidades obtenidas a partir del MDT generado con datos LiDAR aéreo.....	145

4.5.3	Visibilidades obtenidas a partir del MDS generado con datos LiDAR aéreo y LiDAR mobile	147
4.5.4	Visibilidades obtenidas a partir de perfiles teóricos de proyecto.....	149
4.6	DISCUSIÓN.....	151
4.6.1	Efecto de la frecuencia de escaneado LiDAR sobre la localización de obstáculos. Dimensiones del prisma visual y de la unidad prismática rectangular	151
4.6.1.1	Caso 1: Limitación de visión por presencia de un talud de desmonte situado en el interior de una curva	154
4.6.1.2	Caso 2: Limitación de visión por presencia de vegetación en el interior de una curva	182
4.6.1.3	Caso 3: Limitación de visión por presencia de un acuerdo vertical convexo	186
4.6.1.4	Dimensiones del PV y de la UPR.....	201
4.6.1.5	Tiempos de proceso	203
4.6.2	Estudio comparativo de las visibilidades obtenidas mediante prismas visuales (PV), modelo digital del terreno (MDT) y modelo digital de superficies (MDS).....	204
4.6.2.1	Diferencia entre resultados de visibilidad según MDT, MDS y PV	205
4.6.2.2	Diferencia entre resultados de visibilidad disponible obtenidos según MDT y según MDS	212
4.6.2.3	Diferencia entre resultados de visibilidad disponible obtenidos según Modelo Digital del Terreno (MDT) y PV.....	222
4.6.2.4	Diferencia entre resultados de visibilidad disponible obtenidos según MDS y según PV.....	228
4.6.3	Estudio comparativo de las visibilidades obtenidas mediante prismas visuales (PV) y perfiles teóricos de proyecto.....	236
4.6.4	Influencia en el tiempo de percepción y reacción de la anchura de prisma visual en una curva circular	242
5	APORTACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	248
5.1	APLICACIONES PRÁCTICAS	249
5.2	APLICACIONES METODOLÓGICAS	253
6	CONCLUSIONES	256
7	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	261
8	REFERENCIAS.....	265
9	ANEXOS	272
	ANEXO 1: Geometría en planta y alzado de los casos analizados. Carretera CP-29-25 y Carretera CV-35.....	273
	ANEXO 2: Carretera CV-35. Distancias de visibilidad obtenidas por pv, MDT y MDS.....	290
	ANEXO 3: Carretera CV-35. Diferencia entre la distancia de visibilidad obtenida a partir de MDT y a partir de MDS.....	294

ANEXO 4: Carretera CV-35. Diferencia entre la distancia de visibilidad obtenida a partir de MDT y a partir de PV	300
ANEXO 5: Carretera CV-35. Diferencia entre la distancia de visibilidad obtenida a partir de MDS y a partir de PV	306
ANEXO 6: Carretera CV-35. Diferencias entre la distancia de visibilidad obtenida a partir de MDT y MDS con la obtenida a partir de PV.....	312
ANEXO 7: Carretera CV-35. Visibilidades obtenidas por PV, MDT y MDS, y visibilidad requerida según la AASHTO 2011 para la V_{85} estimada.....	318
ANEXO 8: Carretera cv-35. Visibilidades obtenidas a partir de perfiles de proyecto y a partir de PV.....	322