
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



**Departamento de Ingeniería e Infraestructuras de los
Transportes**

**“NUEVA METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE DISTANCIAS
DE VISIBILIDAD DISPONIBLES EN CARRETERAS EXISTENTES
BASADA EN DATOS LIDAR TERRESTRE”**

Autor

José Manuel Campoy Ungría

Director

Prof. Dr. Alfredo García García

Memoria de la Tesis de Doctorado

Valencia, octubre de 2.015

Evaluadores de tesis:

- Castro Malpica, María; (Universidad Politécnica de Madrid)
- De Oña López, Juan José; (Universidad de Granada)
- Iglesias Martínez, Luis; (Universidad Politécnica de Madrid)

Miembros del Tribunal:

- Colomer Ferrándiz, José Vicente; (Universidad Politécnica de Valencia)
- Garach Morcillo, Laura; (Universidad de Granada)
- Rocci Boccaleri, Alessandro; (Universidad Politécnica de Madrid)

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación es el resultado de un gran esfuerzo y dedicación personal que no hubiera sido posible sin el apoyo y la ayuda de muchas personas a las que no quiero dejar de mencionar.

En primer lugar, mi agradecimiento a mi director de tesis Alfredo García García, mi ejemplo de dedicación y de excelencia en investigación. Gracias Alfredo por tu orientación, tu apoyo y tu sabiduría. Recuerdo como si fuera hoy cuando redactaba mi proyecto final de carrera ya con tu tutela. Todo el camino recorrido hasta culminar esta tesis ha sido en tu inestimable compañía.

Fundamental ha sido también el apoyo de Topcon Positioning Spain S.L.U a través de su Delegado Comercial en Valencia, Diego Mosquera y de Ingeniería Insitu S.L. por la aportación desinteresada de los datos Lidar necesarios para la investigación. Nada habría podido hacerse sin ellos.

Mi especial agradecimiento a José Carlos García de DIELMO 3D S.L. por su esencial ayuda en el tratamiento de los datos y en el desarrollo de las aplicaciones y algoritmos empleados en el análisis.

Gracias también a mis compañeros de Departamento y del Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras de la UPV, especialmente a Francisco Javier Camacho Torregrosa, Ana María Pérez Zuriaga y Ana Tsui Moreno Chou, siempre dispuestos a ayudar, así como a José Herráez Boquera, por su orientación inicial.

DEDICATORIAS

A mis padres, José Manuel y Lita, nada habría sido posible sin vosotros, sin vuestro sacrificio y vuestra entrega, sin vuestra orientación y apoyo. Sólo espero poder darles a mis hijos tanto cariño como recibí de vosotros.

A mi mujer, Begoña, siempre a mi lado, incondicional, el pilar y el equilibrio de mi familia y de mi vida. Gracias por tu aliento en los momentos de decaimiento y por tu alegría.

A mis queridos hijos, Álvaro, Héctor e Irene. Mil perdones por las horas que os he dejado de dedicar que son, sin duda, las mejores. Nada de lo que haya hecho en esta vida habría sido para mí mejor, que estar en vuestra compañía.

A mis hermanas, Begoña y Mónica y a cuantos me han infundido fuerzas para llegar hasta aquí.

RESUMEN

La existencia de una visibilidad adecuada a las condiciones reales de operación, es condición indispensable para alcanzar un diseño geométrico seguro. Las distancias de visibilidad requeridas para tareas inherentes a la conducción, tales como la decisión, la parada, el adelantamiento o el cruce, constituyen un parámetro esencial en el diseño geométrico de nuevas carreteras, formando parte importante de todas las guías de diseño a nivel internacional. Sin embargo, una vez construida la carretera y durante el tiempo en que esta se encuentra en servicio, muchas otras circunstancias de su entorno condicionan la visibilidad realmente disponible a lo largo del tiempo.

Por otro lado, dado que las guías de diseño geométrico contemplan las mediciones de visibilidad disponible con el observador y el obstáculo situados sobre la calzada, su medición sistemática y periódica es una complicada y tediosa labor no exenta de riesgos y de perturbaciones al tráfico. En la práctica ingenieril, es habitual el empleo de modelos digitales de elevaciones y de programas específicos de diseño geométrico para establecer las condiciones de visibilidad en carreteras; no obstante, el desarrollo de nuevas tecnologías de teledetección amplían las posibilidades a una mejor estimación de la visibilidad realmente disponible.

La tecnología LiDAR está gozando de un importante impulso a nivel internacional en los últimos años y constituye una importante fuente de información consistente en millones de puntos georreferenciados pertenecientes a todo tipo de objetos que representan no solo la geometría de la propia carretera, sino también su entorno más inmediato. Precisamente por su capacidad de incluir en el análisis todo tipo de obstáculos potenciales a la visión, en la presente Tesis Doctoral se ha desarrollado y analizado una nueva metodología de evaluación sistemática de visibilidades disponibles en carreteras a partir de visuales trazadas directamente contra la nube de puntos LiDAR. Para ello se han definido por primera vez los conceptos de Prisma Visual (PV) y de Unidad Prismática Rectangular (UPR) como elementos básicos constitutivos de esta nueva forma de concebir la visión, alternativos a la tradicional línea recta visual trazada entre el observador y el objetivo.

Durante la investigación se ha analizado el efecto de la densidad de la nube de puntos en los resultados y se ha sometido esta metodología a comparación con los resultados de visibilidad obtenidos por técnicas conocidas a partir de modelos digitales del terreno, modelos digitales de superficies y perfiles de proyecto en dos tramos de carretera existentes. En general, se obtiene una sobreestimación generalizada y en muchos casos significativa de las visibilidades realmente disponibles si se emplean metodologías convencionales en comparación con las obtenidas a partir de la nueva metodología basada en datos LiDAR.

El desarrollo, preparado para la visualización conjunta de resultados de visuales y nube de puntos en tres dimensiones, permite asimismo interpretar el motivo de la obstrucción a la visión, lo que constituye un avance puesto al servicio de los ingenieros en la evaluación de la carretera y en la mejora de sus condiciones de visibilidad y de seguridad vial.

RESUM

L'existència d'una visibilitat adequada a les condicions reals d'operació, es condició indispensable per a aconseguir un disseny geomètric segur. Les distàncies de visibilitat requerides per a tasques inherents a la conducció, tals com la decisió, la parada, l'avançament, o l'encreuament, constitueixen un paràmetre essencial en el disseny geomètric de noves carreteres, formant part important de totes les guies de disseny a nivell internacional. No obstant, una volta construïda la carretera i durant el temps en què es troba en servici, moltes altres circumstàncies del seu entorn condicionen la visibilitat realment disponible.

D'altra banda, donat que les guies de disseny geomètric contempnen les mesures de visibilitat disponible en l'observador i el obstacle situats sobre la calçada, la seua medició es una complicada i tediosa llavor no exempta de riscos i de molèsties al trànsit. En la practica, es habitual l'ús de models digitals d'elevacions i de programes específics de disseny geomètric per a establir les condicions de visibilitat en carreteres; no obstant, el desenvolupament de noves tecnologies de tele-detecció amplien les possibilitats a una millor estima de la visibilitat realment disponible.

La tecnologia LIDAR està gojant d'un important impuls a nivell internacional en els últims anys i constitueix una important font d'informació consistent en milions de punts geo-referenciats de tot tipus d'objectes que representen no només la geometria de la pròpia carretera, sinó també el seu entorn més immediat. Precisament per la seua capacitat d'incloure en l'anàlisi tot tipus d'obstacles potencials a la visió, en el present tesis doctoral s'ha analitzat una nova metodologia d'avaluació sistemàtica de visibilitats disponibles en carreteres a partir de visuals traçades directament contra el núvol de punts LIDAR. Per tal motiu s'han definit per primera vegada els conceptes de Prisma Visual (PV) i d'Unitat Prismàtica Rectangular (UPR) com a elements bàsics constitutius d'aquesta nova forma de concebre la visió, alternatius a la tradicional línia recta visual traçada entre l'observador i el objectiu.

Durant la investigació s'ha analitzat l'efecte de la densitat del núvol de punts en els resultats i s'ha sotmès aquesta metodologia a comparació amb els resultats de visibilitat obtinguts per tècniques conegudes a partir de models digitals del terreny, models digitals de superfícies i perfils de projecte en dos trams de carretera existents. En general, s'obté una sobreestimació generalitzada i en molts casos significativa de les visibilitats realment disponibles si s'empren metodologies convencionals en comparació amb les obtingudes a partir de la nova metodologia basada en dades LiDAR.

El desenvolupament, preparat per a la visualització conjunta de resultats de visuals i núvol de punts en tres dimensions, permet així mateix interpretar el motiu de l'obstrucció a la visió, el que constitueix un avanç posat al servei dels enginyers en l'avaluació de la carretera i en la millora de les seves condicions de visibilitat i de seguretat viària.

SUMMARY

The existence of a visibility that is appropriate to the actual operating conditions is a sine qua non to achieve a safe geometric design. The sight distances required in driving tasks, such as decision-making, stopping, overtaking or crossing, represent an essential parameter in the geometric design of new roads; and they play a key role in all international design guidelines. Nevertheless, once the road has been built and operating, many other surrounding circumstances do determine the actual sight distance available over time.

Moreover, since geometric design guidelines encompass visibility measurements based on the observer and the obstacle located on the roadway, systematic and periodic measurements prove difficult and tedious as well as risky and traffic-disruptive. In engineering practice, it is common to use elevation digital models and geometric design specific programs to establish the visibility conditions on roads; however, the development of new remote sensing technologies expand the possibilities to better estimate the visibility actually available.

LiDAR technology has been enjoying a boost internationally in recent years. It is an important source of information that consists of millions of georeferenced points belonging to all kinds of objects, which represent not only the geometry of the road itself, but also its more immediate surroundings. It is precisely this ability to include all sorts of potential obstacles to vision in the analysis that raised our interest.

This PhD thesis presents a newly developed and tested methodology for the systematic assessment of visibility available on roads that deploys visuals directly drawn against the LiDAR point cloud. To this purpose the concepts of Visual Prism (VP) and Rectangular Prismatic Unit (RPU) have been defined as key elements in this new way of thinking about vision. They represent an alternative to the traditional straight line drawn between the observer and the object.

During the research, the impact on the results of the point cloud density has been analyzed; and this methodology has been compared to the visibility results yielded by known techniques based upon digital terrain models, digital surface models and project profiles in two existing road sections. In general, conventional methods overestimate sight distance compared to the new methodology based on LiDAR data, and in many cases the overestimation is significant..

The development, that displays both visuals and three dimensional point cloud results, also enables to spot the reason for the obstruction of vision. This improvement is practice-ready and could be used while assessing the road and improving the conditions of sight distance and road safety.

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	106
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

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Distancia de visibilidad de parada requerida en recta y en curva. (Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 1994).....	37
Tabla 2: Distancia de parada según diferentes guías de diseño. Fuente: Fambro y elaboración propia	40
Tabla 3: Distancia de visibilidad de adelantamiento requerida en función de la velocidad de proyecto. (Ministerio de Fomento, 2000).....	43
Tabla 4: Distancia de visibilidad de adelantamiento (Ministerio de Transporte de Colombia, 2008).....	44
Tabla 5: Porcentaje recomendado con visibilidad superior a la distancia de adelantamiento según la guía de diseño del Ministerio de Transporte de Colombia, 2008.....	46
Tabla 6: Errores de posicionamiento del sistema Applanix POS-LV520 (equipo Optech Lynx).....	125
Tabla 7: Características de los láser escáner del equipo Optech Lynx (fuente: Optech)....	126
Tabla 8: Error de posicionamiento del sistema IPS-2 Topcon (fuente: Topcon).....	127
Tabla 9: Características técnicas del vuelo LiDAR del PNOA (fuente: IGN).....	128
Tabla 10: Dimensiones del PV y de la UPR consideradas en el análisis.....	154
Tabla 11: Superficies de una sección vertical ortogonal a la línea visual ($\alpha_i=0$) para diferentes valores de anchura a y altura b de dicho prisma.....	156
Tabla 12: Densidad de puntos mínima teórica por debajo de la cual se puede producir la penetración de la visual en el talud.....	157
Tabla 13: Radios, distancias de visibilidad de parada y despejes asociados a diferentes velocidades según las guías de diseño AASHTO,2011 y M. Fomento, 2000.....	163
Tabla 14: Distancias de visibilidad de parada y distancia de visibilidad de parada reducida por efecto de un PV de anchura $a=0.50$ m (criterios AASHTO,2011 y M. Fom.,2000).....	163
Tabla 15: Reducción de las distancias de visibilidad de parada por consideración de diferentes anchuras de PV con respecto a la tradicional línea visual, distancia (a) y porcentaje (b) (criterios AASHTO,2011 Y M.Fom.,2000).....	164
Tabla 16: Talud de desmonte. Tasas de éxito para diferentes anchuras de PV y alturas de UPR. Carretera CV-35.....	182
Tabla 17: Superficies resultantes de la proyección de las UPR consideradas sobre un plano horizontal.....	189

Tabla 18: Densidad de puntos mínima teórica por debajo de las cuáles se puede producir la penetración de la visual en la rasante.....	189
Tabla 19: Dimensiones de la UPR aptas para el cálculo de visión en acuerdos convexos.	190
Tabla 20: Distancia de visibilidad disponible para diferentes alturas de UPR para alturas de observador y obstáculo establecidas por el M. Fomento, 2000 (a) y la AASHTO, 2011 (b).	193
Tabla 21: Porcentaje de reducción de la visibilidad disponible para diferentes alturas de UPR y alturas de observador y obstáculo según criterios M. Fomento, 2000 y AASHTO, 2011.....	193
Tabla 22: Tiempo de proceso. Una visual y talud de desmonte en curva para diferentes densidades de muestra de datos LiDAR (PC i7 a 2,2GHz, 8GB RAM).....	203
Tabla 23: Tiempo de proceso. Una visual y vegetación en el interior de una curva para diferentes densidades de muestra de datos LiDAR (PC Core i7 a 2,2GHz, 8GB RAM).....	203
Tabla 24: Tiempo invertido para variar la posición del observador considerando el efecto de la anchura de PV de 0,50 m en el despeje para diferentes radios y velocidades.....	246
Tabla 25: Tiempo invertido para variar la posición del observador considerando el efecto de la anchura de PV de 0,50 m en el despeje para diferentes radios y velocidades.....	252

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tiempo de percepción-reacción (Olson et al, 1984).....	39
Figura 2: Distancias de parada obtenidas según diferentes guías de diseño. Fuente: elaboración propia.....	41
Figura 3: Fases del adelantamiento y sumandos considerados en la determinación de la distancia de visibilidad de adelantamiento requerida según la AASHTO, 2011.....	43
Figura 4: Distancias empleadas en cada una de las fases del adelantamiento y distancia total (AASHTO, 2011).	44
Figura 5: Distancias de visibilidad de adelantamiento obtenidas según diferentes guías de diseño geométrico (elaboración propia).....	45
Figura 6: Esquemas de visibilidad de cruce establecidos en las guías de diseño española (a) y colombiana (b).	49
Figura 7: Distancias de visibilidad de cruce obtenidas según diferentes guías de diseño geométrico (fuente: elaboración propia).....	50
Figura 8: Distancia de visibilidad de decisión (PVSD), Gattis et al., 1995.....	52
Figura 9. Distancia de visibilidad nocturna disponible sin obstrucción lateral (a) y con obstrucción lateral (b). (Easa et al., 1997).....	54
Figura 10. Distancia de visibilidad nocturna con obstrucción continua. (Easa et al., 1997).....	54
Figura 11. Relación entre radio y despeje lateral mínimo para $\alpha = 20^\circ$ y $\alpha = 10^\circ$. (Easa et al., 1997)	55
Figura 12. Obtención de visibilidad de parada y adelantamiento a partir de un plano de planta (Ministerio de Transporte de Colombia, 2008).....	57
Figura 13. Obtención de visibilidad de parada y adelantamiento a partir de un plano de planta (AASHTO, 2011)	58
Figura 14. Obtención de visibilidad de parada y adelantamiento a partir de un plano de perfil longitudinal (Ministerio de Transporte de Colombia, 2008).....	58
Figura 15. Obtención de visibilidad de parada y adelantamiento a partir de un plano de perfil longitudinal (AASHTO, 2011).....	58
Figura 16. Perfil de visibilidad en acuerdos convexos (Fambro, 1997).....	59
Figura 17. Perfil de visibilidad (Taiganidis, 1998).....	60
Figura 18. Esquema del cálculo de la visibilidad del alzado (Nehate, 2006).....	61

Figura 19. Esquema del cálculo de la visibilidad de la planta (Nehate, 2006).....	62
Figura 20. Ejemplo de elementos finitos de cuatro nodos (a) y seis nodos (b) (Hassan, 1996)	63
Figura 21. Ejemplo de modelado de una carretera con elementos finitos (Hassan, 1996)..	64
Figura 22. Obtención del perfil de la visual teniendo en cuenta la sección transversal (García et al. 2007)	65
Figura 23. Definición del problema dinámico de la distancia de visibilidad de adelantamiento (Yan et al. 2008)	66
Figura 24. Modelos de elementos finitos utilizados en la evaluación de la distancia de visibilidad de adelantamiento (Yan et al. 2008).....	67
Figura 25. Modelización de la geometría de la carretera con el modelo analítico de Ismail, 2007, (izquierda) y con el de elementos finitos (derecha).....	68
Figura 26. Perfil de visibilidad 2D y 3D (Ismail, 2007).....	68
Figura 27. Esquema gráfico de obtención de visibilidades mediante el programa de diseño de carreteras CLIP (TOOL S.A.).....	69
Figura 28: Prisma que convierte la luz blanca en los diferentes colores (fuente: Lerma et al., 2008)	71
Figura 29: El espectro electromagnético (fuente: Lerma et al., 2008).....	71
Figura 30: Medición láser por pulsos (fuente: Lerma et al., 2008).....	74
Figura 31: Principio de un láser escáner basado en tiempo de vuelo (fuente: Lerma et al., 2008)	75
Figura 32: Máximo rango de certeza en función de la frecuencia de pulso (fuente: Lerma, et. al., 2008)	76
Figura 33: Principio de medición basado en la fase (fuente: Lerma et al., 2008).....	77
Figura 34: Esquema de dos modulaciones de onda y una onda portadora para la medición de distancia basada en fase (fuente: Pfeifer et al., 2007).....	78
Figura 35: Sistemas de LiDAR aéreo (izquierda) y LiDAR mobile (derecha).....	79
Figura 36: Componentes de un sistema LiDAR aéreo.....	81
Figura 37: Sistema de cámaras digitales integrado Ladybug3 (fuente: Petrie, 2010).....	82
Figura 38: Laser escáner SICK LMS 291 2D (fuente: Petrie, 2010).....	83
Figura 39: Componentes básicos de un sistema LiDAR Mobile IP-S2 (izquierda) y ejemplo de toma de nube de puntos obtenida con tres laser escáner SICK (derecha) (fuente: Topcon)	84

Figura 40: Reflexión ideal, iluminación parcial, oclusión parcial (fuente: Lerma et al., 2008).....	86
Figura 41: Problema del borde partido (fuente: Lerma et al., 2008).....	86
Figura 42: Reflexión sobre una superficie lambertiana (fuente: Lerma et al., 2008).....	87
Figura 43: Respuesta de la señal cuando se escanean superficies con diferente reflectividad (fuente: Lerma et al., 2008).....	88
Figura 44: Efectos de la refracción en materiales semitransparentes no homogéneos (fuente: Lerma et al., 2008).....	89
Figura 45: a) Modelo Digital de Superficies; b) Modelo Digital del Terreno (fuente: Vosselman et al., 2010).....	93
Figura 46: Estructura de líneas estimadas según los datos de un escaneado láser aéreo. a) vista de MDT formado a partir de un modelo en rejilla híbrido; b) vista de un MDT formado a partir de TIN (fuente: Vosselman et al., 2010).....	95
Figura 47: Inconsistencias entre dos conjuntos de datos procedentes del solape de dos pasadas de escaneado láser aéreo (fuente: Karel et al., 2006).....	96
Figura 48: Inconsistencias dentro de un mismo conjunto de datos procedentes de un escaneado láser aéreo debidas a un deficiente funcionamiento del equipo (fuente: Karel et al., 2006)	97
Figura 49: Triángulos de visibilidad considerados en una intersección según Khattak et al. (2003) (fuente: Khattak et al., 2003).....	99
Figura 50: Ortofoto y datos LiDAR empleados por Khattak et al. (2003) (fuente: Khattak et al., 2003)	100
Figura 51: Superficie TIN generada a partir de los datos LiDAR correspondientes a un modelo digital de superficies (MDS) (fuente: Khattak et al., 2003).....	100
Figura 52: Líneas visuales obtenidas con la localización de sus obstrucciones (fuente: Khattak et al., 2003).....	101
Figura 53: Nube de puntos LiDAR original y Modelo Digital de Superficies obtenido a partir de ella (fuente: Tsai, et al., 2010).....	103
Figura 54: Interface del software Qt-Ballad empleado en el cálculo de visibilidades disponibles (fuente: Charbonier et al, 2010).....	104
Figura 55: Comparación gráfica de visibilidades disponibles obtenidas a partir de datos LiDAR, estéreo-visión y vehículos en seguimiento (fuente: Charbonier et al, 2010).....	104
Figura 56: Modelo 3D generado a partir de datos LiDAR terrestres y planos de visión obtenidos (fuente: Constantinos et al., 2011).....	105

Figura 57: Obtención de visibilidades mediante secciones transversales obtenidas a partir de datos LiDAR (fuente: Ibáñez, et al., 2012).....	106
Figura 58: Ubicación del láser escáner y nube de puntos obtenida para la medición de áreas sin visión en maquinaria pesada (fuente: Teizer et al., 2010).....	107
Figura 59: Modelo de cuadrículas de ocupación tridimensionales (Elfes, 1989).....	107
Figura 60: Planos de visión obtenidos para diferentes alturas hasta una distancia de 10 m desde el punto de observación: las áreas azules indican zonas sin visión, los puntos rojos corresponden a la cabina del vehículo (fuente: Teizer et al., 2010).....	108
Figura 61: Visibilidad de un trabajador en diferentes ubicaciones (A, B y C) cerca de la máquina (fuente: Teizer et al.,2010).....	108
Figura 62: Prisma visual (PV) considerado entorno a la línea recta visual OT.....	113
Figura 63: Proyección vertical sobre el plano XY de la porción de espacio considerada ...	113
Figura 64: Unidad prismática rectangular (UPR) en que se divide el prisma visual VP.....	114
Figura 65: Proyección de los puntos LiDAR pertenecientes a la UPR sobre el plano vertical que contiene al punto observador y al punto objetivo.....	115
Figura 66: Sistema de referencia local bidimensional $X'Y'$	115
Figura 67: Coordenada X'_i del punto $P_i (X_i, Y_i, Z_i)$ en el sistema de referencia $X'Y'$	116
Figura 68: Representación de las porciones de recta visual visibles y no visibles expresada en el en el sistema de referencia local bidimensional $X'Y'$	118
Figura 69: Capturas de pantalla del programa de visualización NASA World Wind.....	119
Figura 70: Visualización del MDT, la ortofotografía aérea y la nube de puntos LiDAR mediante el programa NASA World Wind ampliado.....	120
Figura 71: Visualización conjunta de las líneas visuales obtenidas con la nueva metodología, el MDT y la nube de puntos LiDAR mediante el programa NASA World Wind ampliado.....	120
Figura 72: Localización y características carretera convencional CP-29-25 (equipo Optech).	123
Figura 73: Localización y características carretera convencional CV-35 (equipo Topcon).	124
Figura 74: Vehículo dotado con el equipo OPTECH-Lynx.....	125
Figura 75: Vehículo dotado con el equipo IPS-2.....	126
Figura 76: MDT del mismo tramo de carretera CV-35: a) curvado del MDT05 del IGN (5 m de resolución, sin estructuras) y b) curvado del MDT generado para esta investigación (1 m de resolución, con estructuras).....	129

Figura 77: Visualización tridimensional del MDT obtenido a partir de datos LiDAR aéreo (carretera CV-35 con estructuras).....	130
Figura 78: a) Vista tridimensional de datos LiDAR mobile, b) Rasterización en celdas de 1m x 1m.....	131
Figura 79: Visualización tridimensional de MDS obtenido a partir de datos LiDAR aéreo y LiDAR mobile (carretera CV-35).....	132
Figura 80: a) Resultado de un MDS curvado sin eliminación del “ruido” generado por el tráfico durante el escaneado. b) Perfiles transversales antes y después de la eliminación del “ruido”	132
Figura 81: Curvado (a) y visualización tridimensional (b) de un MDS sin eliminación del “ruido” generado por el tráfico durante el escaneado.....	133
Figura 82: Perfil teórico de proyecto (carretera CV-35).....	134
Figura 83: Ejemplo de nube de puntos original correspondiente a la mayor densidad D1 (a) y la correspondiente a la densidad D4 (b). Carretera CP-29-25 (Lugo).....	136
Figura 84: Diagrama del proceso seguido para la obtención de visibilidades disponibles.....	140
Figura 85: Captura de pantalla de líneas visuales trazadas desde diferentes observadores hacia diferentes objetivos según el algoritmo de cálculo desarrollado bajo GVSIG (carretera CV-35).....	141
Figura 86: Captura de pantalla de resultados del cálculo expresados en fichero formato <i>.xml</i> a partir de la aplicación específica implementada en GVSIG.....	142
Figura 87: Captura de pantalla de resultado gráfico en formato <i>.kml</i> en dos dimensiones GlobalMapper (trial versión) (a), y en tres dimensiones, Nasa World Wind (b).....	142
Figura 88: Visibilidades disponibles obtenidas por la metodología de prismas visuales (carretera CV-35)	145
Figura 89: Determinación de la existencia o no de visión según la metodología empleada por el software de diseño geométrico CLIP (V-1.27.54.265.0g-0a-d0).....	145
Figura 90: Restitución geométrica del eje con ubicación de marcas fijas referencia de perfiles transversales cada 5,0 m (carretera CV35).....	146
Figura 91: Visibilidades disponibles obtenidas mediante software de diseño sobre el MDT (carretera CV-35)	147
Figura 92: Visibilidades disponibles obtenidas mediante software de diseño sobre el MDS (carretera CV-35)	148
Figura 93: Visibilidades disponibles obtenidas mediante software de diseño con perfiles teóricos de proyecto (carretera CV-35).....	150
Figura 94: Dimensiones <i>a</i> y <i>b</i> que definen la anchura del PV y el volumen de la UPR.....	153

Figura 95: Diferentes ángulos de incidencia en el talud de la línea visual y línea visual tangente que delimita la posición de mayor distancia de visibilidad desde un observador O.155

Figura 96: Efecto de la anchura de PV en la determinación de la visibilidad de un objetivo T_i (b, c) en contraposición a la tradicional línea visual (a)155

Figura 97: Diferentes secciones resultantes de la intersección de un plano vertical i con un prisma de anchura a y altura b supuesta una línea visual horizontal.....156

Figura 98: Diferencia en el posicionamiento de los puntos de interrupción a la visión para diferentes ángulos de incidencia de la línea de visión sobre el talud y diferentes anchuras de PV.....158

Figura 99: La separación entre el talud y la línea visual y la anchura de PV en caso de paralelismo o tangencia determinan la existencia o no de visión.....159

Figura 100: Despeje necesario en curva (F) para garantizar una distancia de visibilidad D (M. Fomento, 2000)160

Figura 101: Despeje necesario en curva (F) para garantizar una distancia de visibilidad D (a) (M.Fomento, 2000); Efecto de la anchura de PV (b).....161

Figura 102: Caso analizado: desmonte en el interior de una curva en la carretera CP-29-25...165

Figura 103: Puntos de observación y visuales radiadas desde ellos con intersección en el talud de desmonte. Carretera CP-29-25 (GvSIG).....166

Figura 104. Ejemplo de punto de observación y visuales radiadas desde él con intersección en el talud de desmonte. Vista en planta (Global Mapper trial versión) y en tres dimensiones (Nasa World Wind).....167

Figura 105: Desmonte en el interior de una curva en la carretera CP-29-25. Diferentes perspectivas obtenidas de las visuales y de la nube de puntos LiDAR (Nasa World Wind).168

Figura 106: Puntos obstáculo identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D coloreados atendiendo al tipo de densidad de muestra D . (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)169

Figura 107: Puntos obstáculo identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D coloreados atendiendo al valor de anchura de PV. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)...169

Figura 108: Puntos obstáculo identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D coloreados atendiendo al valor de altura de la UPR. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)170

Figura 109: Ejemplo de resultados para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por Densidad. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4)	170
Figura 110: Ejemplo de resultados para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por anchura de PV. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4)	171
Figura 111: Ejemplo de resultados para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por altura de UPR. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4)	171
Figura 112: Distancia de los puntos de observación a los obstáculos identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D. Color según densidad de la muestra. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)	172
Figura 113: Distancia de los puntos de observación a los obstáculos identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D. Color según anchura del PV. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)	172
Figura 114: Distancia de los puntos de observación a los obstáculos identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D. Color según altura de la UPR. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)	173
Figura 115: Ejemplo de resultados de distancia entre observador y obstáculo para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por Densidad. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4).....	173
Figura 116: Ejemplo de resultados de distancia entre observador y obstáculo para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por anchura de PV. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4).....	173
Figura 117: Ejemplo de resultados de distancia entre observador y obstáculo para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por altura de UPR. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4).....	174
Figura 118: Ejemplo de visuales obtenidas en la Carretera CP-29-25. PK 0+935, Densidad=D3, con $a=0,10$ m y b variable, con un caso de penetración en el talud ($b=0,05$ m) (Globalmapper, trial version).....	174
Figura 119: Ejemplo de visuales obtenidas en la Carretera CP-29-25. PK 0+935, Densidad=D3, $a=0,10$ m y b variable, con un caso de penetración en el talud ($b=0,05$ m) (Nasa World Wind).	175
Figura 120: Talud de desmonte. Tasas de éxito para diferentes densidades, alturas de UPR y anchuras de PV (a , b y c respectivamente). Carretera CP-29-25.....	176
Figura 121: Caso analizado: desmonte en el interior de una curva en la carretera CV-35..	177

Figura 122: Punto de observación y visuales radiadas desde él con intersección en el talud de desmonte en la carretera CV-35 (GvSIG, Globalmapper y Nasa World Wind).....	178
Figura 123: Desmonte en el interior de una curva. Diferentes perspectivas obtenidas de la vista tridimensional de las visuales y de la nube de puntos LiDAR (Carretera CV-35).....	179
Figura 124: Vista en planta de algunas visuales con penetración en el talud. Carretera CV-35 (Globalmapper trial versión).....	180
Figura 125: Vista tridimensional de algunas visuales con penetración en el talud. Carretera CV-35 (Nasa World Wind).	181
Figura 126: Talud de desmonte. Tasas de éxito para diferentes anchuras de PV. Carretera CV-35.....	181
Figura 127: Talud de desmonte. Tasas de éxito para diferentes alturas de UPR. Carretera CV-35.....	182
Figura 128: Caso analizado: vegetación en el interior de una curva en la carretera CP-29-25.	183
Figura 129: Visuales radiadas para el caso de vegetación en el interior de una curva. Carretera CP-29-25 (GvSIG).	183
Figura 130: Visuales y nube de puntos para el caso de vegetación en el interior de una curva. Carretera CP-29-25 (GlobalMapper trial versión y Nasa World Wind).....	184
Figura 131: Perspectivas obtenidas de la visualización tridimensional de las visuales y de la nube de puntos LiDAR para el caso 2. Carretera CP-29-25 (Nasa World Wind).....	185
Figura 132: Vegetación interior en una curva. Tasas de éxito para diferentes anchuras de PV. Carretera CP-29-25.....	185
Figura 133: Vegetación interior en una curva. Tasas de éxito para diferente altura de UPR. Carretera CP-29-25.....	185
Figura 134: Vegetación en el interior de una curva. Tasas de éxito para anchura de PV. 186	
Figura 135: Concepción tradicional de visión en un acuerdo vertical convexo basada en la tangencia de la línea visual con la rasante.....	186
Figura 136: Representación esquemática de la Intersección de la unidad prismática rectangular con la superficie de rasante en un acuerdo vertical convexo.....	187
Figura 137: Acuerdo convexo: Representación esquemática de la incidencia de la línea visual sobre la rasante y sección vertical de la UPR en el punto de intersección.....	187
Figura 138: Mecanismos de escaneado y muestras de puntos LiDAR resultantes.....	188
Figura 139: Ejemplo de proyección sobre el plano horizontal de puntos LiDAR contenidos en la UPR para distintos tipos de escaneado.....	189

Figura 140: Parámetros para la obtención de la distancia disponible dentro de un acuerdo convexo para alturas de observador y obstáculo h_1 y h_2 respectivamente.....	191
Figura 141: Efecto de la UPR en la consideración de la existencia de visión en un acuerdo convexo.....	192
Figura 142: Caso analizado: acuerdo vertical convexo en la carretera CV-35.....	194
Figura 143: Punto de observación y visuales radiadas desde él con intersección en el acuerdo convexo (carretera CV-35, GvSIG).....	195
Figura 144: Acuerdo vertical convexo. Diferentes perspectivas obtenidas de la visualización tridimensional de las visuales y de la nube de puntos LiDAR. Carretera CV-35.....	196
Figura 145: Acuerdo convexo: Posición del obstáculo localizada para diferentes valores de anchura de PV y altura de UPR. Color por anchura de PV. (Carretera CV-35. PK 3+200, Visual 3)	197
Figura 146: Acuerdo convexo: Posición del obstáculo localizada para diferentes valores de anchura de PV y altura de UPR. Color por altura de la UPR. (Carretera CV-35. PK 3+200, Visual 3)	198
Figura 147: Acuerdo vertical convexo. Tasas de éxito para diferentes anchuras de PV (a) y alturas de UPR (b). Carretera CV-35.....	199
Figura 148: Acuerdo convexo. Distancias al obstáculo identificado para diferentes alturas de UPR (figura superior) y anchuras de PV (figura inferior). (Carretera CV-35 P.K. 3+200. Visual 8)	200
Figura 149: Ejemplo de diferente posicionamiento longitudinal del obstáculo para diferentes alturas de UPR.....	201
Figura 150: Visibilidades disponibles obtenidas mediante prismas visuales y software de diseño aplicado a MDT y a MDS (Carretera CV-35).....	204
Figura 151: Visibilidades disponibles obtenidas mediante prismas visuales y software de diseño aplicado a MDT y a MDS (Carretera CV-35, pk. 0+000 a 0+500).....	205
Figura 152: Visibilidades disponibles obtenidas mediante prismas visuales y software de diseño aplicado a MDT y a MDS (Carretera CV-35, pk. 0+000 a 0+500).....	206
Figura 153: Visibilidades disponibles obtenidas mediante prismas visuales y software de diseño aplicado a MDT y a MDS (carretera CV-35, pk. 1+500 a 2+000).....	206
Figura 154: Carretera CV-35. Porcentaje de estaciones de observación correspondientes a cada metodología que presentan menores valores de visibilidad disponible.....	207
Figura 155: Proporción de puntos de observación en los que la metodología de prismas visuales supone un déficit de visibilidad superior al mínimo valor de visibilidad obtenido por las metodologías basadas en MDT y MDS (carretera CV-35).....	208

Figura 156: Velocidad de operación V85 estimada en el tramo de carretera CV-35 analizado según la metodología de Pérez, 2012.....	208
Figura 157: Resultados de visibilidad disponible por MDT, MDS y PV y requerida según metodología AASHTO 2011 para la velocidad de operación V85 estimada (carretera CV-35)..	211
Figura 158: Proporción de puntos de observación con visibilidad requerida para V85 y formulación AASHTO 2011 superior a la disponible para cada metodología (carretera CV-35)	211
Figura 159: Vista de un perfil transversal obtenido a partir de MDT y de MDS con presencia de vegetación arbórea en su margen izquierda (P.K. 1+100, Carretera CV35).....	213
Figura 160: Carretera CV-35. Modelo tridimensional generado a partir del MDS donde pueden observarse los sistemas de contención junto a la plataforma (Clip Windows).....	214
Figura 161: Carretera CV-35. Detalle alcanzado en el modelo tridimensional generado a partir del MDS donde se aprecia el abatimiento a tierra de una barrera de seguridad (Clip Windows).	215
Figura 162: Visibilidades disponibles obtenidas mediante software de diseño aplicado a MDT y a MDS (carretera CV-35)	215
Figura 163: Visibilidades disponibles obtenidas mediante software de diseño aplicado a MDT y a MDS entre el 0+000 y el 0+500 (carretera CV-35).....	216
Figura 164: Diferencia entre las distancias de visibilidad obtenidas por MDT y por MDS (carretera CV35)	216
Figura 165: Perfiles transversales obtenidos de MDS (izquierda, donde puede observarse vegetación y sistemas de contención) y de MDT (derecha) de los mismos puntos kilométricos.....	217
Figura 166: Tramo de la CV-35 analizada en el que la visibilidad disponible por MDT es superior a la obtenida por MDS.....	217
Figura 167: Tramo de la CV-35 analizada en el que existen estaciones de observación en las que la visibilidad disponible por MDS es superior a la obtenida por MDT.....	218
Figura 168: Porcentaje de estaciones de observación en los que la visibilidad disponible según MDT es mayor o menor que por MDS (carretera CV-35).....	218
Figura 169: Perfil longitudinal con las dos rasantes obtenidas por MDT y MDS (carretera CV-35)	219
Figura 170: Diferencia de cota en el eje entre la rasante ajustada al MDS y la ajustada al MDT (carretera CV-35)	219
Figura 171: Perfiles Transversales según MDS (izquierda) y según MDT (derecha) del mismo punto kilométrico (p.k. relativo 2+500, carretera CV-35).....	220

Figura 172: Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad obtenido a partir de MDT y el obtenido a partir de MDS supera un determinado valor (carretera CV-35).....220

Figura 173: Visibilidad por MDS > Visibilidad por MDT. Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad es superior a un determinado valor (Carretera CV-35).....221

Figura 174: Gráfico de frecuencias acumuladas para diferencias de visibilidad obtenidas por MDT y MDS (Carretera CV-35)222

Figura 175: Diferencia entre las distancias de visibilidad obtenidas por MDT y por PV (carretera CV35)223

Figura 176: Ejemplo de obstáculos localizados en la metodología de PV que no están presentes en el MDT (Carretera CV-35. Nasa World Wind).....223

Figura 177: Tramo de la CV-35 analizada en el que la visibilidad disponible por MDT es superior a la obtenida por PV (carretera CV-35).....224

Figura 178: Porcentaje sobre el total de puntos de observación en los que la visibilidad disponible según MDT es mayor o igual que por PV (carretera CV-35).....224

Figura 179: Tramo de la CV-35 en el que existen estaciones donde la visibilidad disponible por Prismas Visuales es superior a la obtenida por MDT.....225

Figura 180: Tramo de la CV-35 en el que se muestra la coincidencia de estaciones en las que las diferencias entre la visibilidad por MDT y la visibilidad por MDS y PV, comparten mayoritariamente signo y orden de magnitud.....225

Figura 181: Diferencia entre la visibilidad obtenida por MDT con la obtenida por MDS y por PV (Carretera CV-35).....226

Figura 182: Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad obtenido a partir de MDT y a partir de PV supera un determinado valor (carretera CV-35).....227

Figura 183: Visibilidad por PV > Visibilidad por MDT. Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad es superior a un determinado valor (carretera CV-35).....227

Figura 184: Gráfico de frecuencias acumuladas para diferencias de visibilidad obtenidas por MDT y PV (Carretera CV-35).....228

Figura 185: Carretera CV-35. MDS (izquierda) y nube de puntos LiDAR mobile (derecha)229

Figura 186: Diferencia entre las distancias de visibilidad obtenidas por MDS y por PV (carretera CV35)230

Figura 187: Vegetación baja representada en un perfil transversal obtenido del MDS (imagen superior) y vista de la nube de puntos LiDAR en ese mismo tramo y de las visuales obtenidas por PV (imágenes inferiores)	230
Figura 188: Granulado característico del MDS propio del modelo basado en rasterización previa.....	231
Figura 189: Efecto del tamaño de la celda raster en la morfología del perfil transversal resultante. Tamaño mayor (a), tamaño menor (b).....	231
Figura 190: Efecto de la posición del plano de sección vertical y del tamaño de celda en la morfología del perfil transversal resultante.....	232
Figura 191: Tramo de la CV-35 en el que la visibilidad disponible por MDS es superior a la obtenida por Prismas Visuales.....	233
Figura 192: Tramo de la CV-35 en el que existen estaciones donde la visibilidad disponible por Prismas Visuales es superior a la obtenida por MDS.....	233
Figura 193: Porcentaje sobre el total de puntos de observación en los que la visibilidad disponible según MDS es mayor o igual que por PV (carretera CV-35).....	234
Figura 194: Representación conjunta de la diferencia entre los resultados de visibilidad por MDT y MDS en relación a los obtenidos por PV (carretera CV-35).....	234
Figura 195: Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad obtenido a partir de MDS y a partir de PV supera un determinado valor (Carretera CV-35).....	235
Figura 196: Representación conjunta del porcentaje de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad obtenido a partir de MDT y MDS con respecto al obtenido por PV supera un determinado valor (carretera CV-35).....	235
Figura 197: Gráfico de frecuencias acumuladas para diferencias de visibilidad obtenidas por MDS y PV (Carretera CV-35).....	236
Figura 198: Visibilidades disponibles obtenidas mediante perfiles teóricos de proyecto y PV (carretera CV-35)	237
Figura 199: Diferencia entre las distancias de visibilidad obtenidas por perfiles teóricos de proyecto y por PV (carretera CV35)	238
Figura 200: Tramo de la CV-35 analizada en el que la visibilidad disponible por perfiles teóricos de proyecto es superior a la obtenida por PV (carretera CV-35).....	238
Figura 201: Porcentaje sobre el total de puntos de observación en los que la visibilidad disponible por perfiles teóricos de proyecto es mayor o igual que por PV (carretera CV-35)..	239

Figura 202: Tramo de la CV-35 en el que existen estaciones donde la visibilidad disponible por Prismas Visuales es superior a la obtenida por perfiles de proyecto.....239

Figura 203: Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad obtenido a partir de Perfiles de Proyecto y a partir de PV supera un determinado valor (carretera CV-35).....240

Figura 204: Gráfico de frecuencias acumuladas para diferencias de visibilidad obtenidas por Perfiles de Proyecto y PV (Carretera CV-35).....241

Figura 205: Distancias de visibilidad disponible variables en un tramo circular en presencia de un obstáculo Q interior a la curva.....242

Figura 206: Distancia de visibilidad disponible para los casos de línea visual recta (a) y prisma visual (b) en presencia de un obstáculo P interior a la curva.....243

Figura 207: Posición de los observadores O_1 y O_2 que determinan la distancia de visibilidad mínima en presencia de un obstáculo P interior a la curva, correspondientes a línea recta visual y prisma visual respectivamente.....245

1 Introducción

1.1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La existencia de una visibilidad adecuada a las condiciones reales de operación, es condición indispensable para alcanzar un diseño geométrico seguro. Las distancias de visibilidad requeridas para tareas inherentes a la conducción, tales como la orientación, la parada, el adelantamiento o el cruce, constituyen un parámetro esencial en el diseño geométrico de nuevas carreteras, formando parte importante de todas las guías de diseño a nivel internacional.

Sin embargo, una vez construida la carretera y durante el tiempo en que esta se encuentra en servicio, muchas otras circunstancias de su entorno condicionan la visibilidad realmente disponible. La disposición de la señalización o de las barreras de protección, la vegetación circundante y cambiante a lo largo del tiempo, las modificaciones y mejoras de la carretera y de su entorno inmediato llevadas a cabo durante su conservación y explotación, o las medidas de protección ambiental y contra el ruido que puedan irse adoptando, pueden modificar sustancialmente las condiciones de visibilidad realmente disponibles y diferir de aquellas que pretendieron garantizarse con su diseño geométrico inicial.

En otros casos, las carreteras en servicio son tan solo el resultado de antiguas sendas o caminos adaptados y mejorados para la circulación de vehículos automóviles. Estas carreteras ni siquiera responden a una concepción geométrica global que haya tenido en la visibilidad, uno de sus criterios de diseño.

Existe, por tanto, una gran diferencia entre la importancia que a la visibilidad se le asigna en la definición geométrica de nuevas carreteras de acuerdo con lo establecido en las guías de diseño actuales y la forma de comprobar y controlar la idoneidad y evolución en el tiempo de la visibilidad real en carreteras existentes.

Por otro lado, dado que las mediciones de visibilidad disponible deben llevarse a cabo con el observador y el obstáculo situados sobre la calzada, su medición sistemática y periódica es una complicada y tediosa labor no exenta de riesgos y de perturbaciones al tráfico. Los bajos rendimientos, el coste y el riesgo asociados a comprobaciones de la visibilidad llevadas a cabo por operarios de forma manual o mediante dos vehículos en seguimiento impiden que, hoy por hoy, formen parte común de las labores ordinarias y sistemáticas de inspección y mantenimiento de la vía.

Es necesario por tanto, plantearse nuevas formas de obtención de visibilidades disponibles en carreteras más eficientes y seguras. En este contexto, las técnicas de teledetección basadas en sistemas LIDAR (Light Detection and Ranging), cuyo desarrollo está gozando de un gran impulso en los últimos años, permiten la captura masiva de puntos georreferenciados pertenecientes a las superficies del entorno inmediato de la carretera, de manera que es posible contar con información tanto de su propia geometría, como también del resto de obstáculos que pueden impedir la visibilidad tales como barreras, señales, muros o vegetación.

Teniendo en cuenta la importancia que para la seguridad vial tiene contar con técnicas fiables para conocer las visibilidades realmente disponibles en carreteras en servicio, el objetivo global de la investigación de la presente Tesis Doctoral es desarrollar y analizar una nueva metodología de evaluación sistemática de visibilidades disponibles a partir de datos obtenidos con técnicas LiDAR. Para ello, se hace uso tanto de datos procedentes de sistemas láser montados en un avión (LiDAR aéreo), como de sistemas montados sobre un vehículo automóvil (LiDAR mobile).

Esta investigación se centra en la consecución de los siguientes objetivos específicos:

1. Describir los modelos de evaluación de las visibilidades disponibles empleados hasta el momento.
2. Desarrollar una metodología propia para la obtención de visibilidades disponibles basada en los datos LiDAR mobile.
3. Determinar las condiciones que deben cumplir los parámetros utilizados en el desarrollo anterior en función de las características de la nube de puntos LiDAR mobile.
4. Comparar las visibilidades obtenidas con la nueva metodología con las calculadas mediante herramientas de diseño geométrico actuales a partir de modelos digitales del terreno y modelos digitales de superficies obtenidos con datos LiDAR, así como con las obtenidas a partir de perfiles teóricos de diseño ajustados a las condiciones existentes.
5. Analizar las diferencias obtenidas entre los resultados arrojados por la nueva metodología basada en datos LiDAR con los habitualmente obtenidos en la práctica ingenieril basados en herramientas informáticas comerciales de diseño de carreteras y modelos digitales del terreno, estudiando la posible sobreestimación de las visibilidades disponibles.

1.2 HIPÓTESIS

Las hipótesis inicialmente establecidas y que son analizadas en el proceso de la investigación, son las siguientes:

- 1) La precisión y densidad de la nube de puntos obtenida con técnicas LiDAR actuales permite una correcta localización de los obstáculos que impiden la visión en entornos viarios.
- 2) Las visibilidades reales percibidas por el ser humano pueden ser aproximadas con suficiente aproximación por prismas rectos visuales de cierta anchura a definir, generados a partir de la unión en línea recta del observador y el objeto observado.

- 3) En las curvas circulares, la consideración de pequeñas anchuras de prisma recto visual no tiene influencia significativa en los tiempos de percepción y reacción habitualmente empleados en las guías de diseño geométrico.
- 4) Densidades insuficientes en la nube de puntos LiDAR pueden provocar falsos resultados positivos de visibilidad por penetración a través de ellos de la visual.
- 5) A partir de ciertas densidades en la nube de puntos LiDAR no se obtienen visibilidades más precisas.
- 6) Las visibilidades obtenidas en carreteras existentes a partir de modelos digitales del terreno procedentes de datos LiDAR aéreo, sobreestiman las visibilidades realmente disponibles.
- 7) Las visibilidades estimadas en fase de diseño a partir de perfiles transversales de proyecto, sobreestiman las visibilidades realmente disponibles.
- 8) En carreteras existentes, el uso de modelos digitales del terreno procedentes de datos LiDAR aéreo arroja resultados de visibilidad disponibles superiores a las obtenidas con el empleo de modelos digitales de superficies procedentes de datos LiDAR aéreo y LiDAR mobile.

1.3 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

Para alcanzar los objetivos anteriores, el trabajo de investigación se ha desarrollado en las siguientes fases:

1. Investigación del estado actual del conocimiento en cuanto a la estimación de las visibilidades disponibles en carreteras y al uso de los datos LiDAR para dicha estimación.
2. Concepción, desarrollo y programación de una sistemática de cálculo basada en prismas visuales y en los datos de la nube de puntos LiDAR mobile.
3. Obtención de varias muestras de datos LiDAR aéreo y LiDAR mobile de un tramo de carretera para la aplicación tanto de las metodologías convencionales basadas en modelos digitales del terreno y modelos digitales de superficies, como de la nueva metodología basada en prismas visuales.
4. Comparación de los resultados obtenidos según las diferentes metodologías y análisis de resultados.

5. Obtención de conclusiones sobre los resultados obtenidos referentes a las visibilidades disponibles, aportaciones originales del desarrollo de la tesis e identificación de futuras líneas de investigación.

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo está dividido en ocho apartados en los que se describe la problemática planteada para la realización del estudio, la metodología seleccionada para la evaluación del problema, así como las conclusiones de aplicación práctica. Cada uno de dichos apartados trata los siguientes aspectos:

1: Introducción. En este apartado se presenta una breve descripción del área de investigación de la tesis, de los objetivos e hipótesis planteados y de las fases desarrolladas para alcanzar dichos objetivos.

2: Estado del Arte. En la primera parte de este apartado se analizan tanto la importancia conferida a las visibilidades en el diseño geométrico de carreteras, como los métodos de cálculo actualmente existentes, mientras que en una segunda parte, se describen los fundamentos de la tecnología LiDAR, sus aplicaciones a la obtención de modelos digitales y los métodos hasta ahora desarrollados para la evaluación de visibilidades a partir los datos LiDAR.

3: Metodología de la Investigación. En este apartado se describen las fases desarrolladas en la tesis para crear un procedimiento de análisis de las visibilidades disponibles en carreteras existentes a partir de datos LiDAR.

4: Desarrollo Experimental y Discusión. En este apartado se describen los datos empleados para la aplicación de la metodología de la investigación propuesta en la tesis, los resultados obtenidos tanto por aplicación directa de la nueva metodología, como a partir de modelos digitales del terreno, modelos digitales de superficies y perfiles teóricos de diseño, así como la discusión sobre los mismos. De todas las visibilidades asociadas a diferentes maniobras de conducción, la visibilidad de parada ha sido, por su importancia y amplia difusión científica y normativa así como por la necesidad de facilitarla a lo largo de todo el desarrollo de la carretera, la empleada en los estudios y análisis comparativos.

5: Aportaciones de la Investigación. En este apartado se resumen las principales aportaciones tanto metodológicas como prácticas resultantes de la investigación para su uso en diferentes ámbitos de la ingeniería de carreteras.

6: Conclusiones. En este apartado se resumen brevemente los principales aspectos considerados en la tesis, desde la motivación de la investigación, hasta los principales resultados y sus implicaciones prácticas, pasando por un breve repaso de la metodología propuesta.

7: Futuras Líneas de Investigación. En este apartado se muestran las necesidades de investigación adicional que requieren, tanto la nueva metodología de obtención de visibilidades disponibles propuesta, sobre la que es necesario profundizar, como también algunas reflexiones sobre el enorme campo de investigación al que se accede si es posible contar con información complementaria de visibilidad real.

8: Referencias. En este apartado se recogen las referencias recogidas en el texto y que han sido la base documental sobre la que se cimienta la tesis.

9: Anexos de la Tesis. En este apartado se recoge información gráfica complementaria que permite profundizar en el análisis de los resultados. Dado que los resultados obtenidos parten de dos carreteras con geometría diversa, en el Anexo 1 se presenta la geometría en planta y alzado de los casos analizados (carretera CP-29-25 en Lugo y carretera CV-35 en Valencia). En el Anexo 2 se muestran de forma gráfica los resultados de distancia de visibilidad disponible obtenidos mediante la nueva metodología de prismas visuales (PV) y las metodologías basadas en modelos digitales del terreno (MDT) y de superficies (MDS) para cada uno de los puntos kilométricos de la carretera CV-35. En los Anexos 3, 4 y 5 se muestran asimismo estos resultados pero en una comparativa dos a dos, resultados según MDT y MDS, según MDT y PV y según MDS y PV, respectivamente. En el Anexo 6 por su parte se cuantifican las diferencias puestas de manifiesto en los gráficos presentados en los anexos anteriores mientras que en el Anexo 7 se muestran los gráficos comparativos de estas tres metodologías cuando además se introducen las necesidades de visibilidad requeridas por una estimación de la velocidad de operación en el tramo. Finalmente, en el Anexo 8 se muestran las diferencias entre los resultados de visibilidad obtenidos a partir de perfiles de proyecto y a partir de la nueva metodología de prismas visuales.

2 Estado del arte

2.1 LA VISIBILIDAD EN LAS PRINCIPALES MANIOBRAS DE LA CONDUCCIÓN

La visión es un aspecto inherente a la labor de conducción llevada a cabo por el ser humano, siendo el sentido que permite al conductor percibir una parte muy importante de la información, y a partir de ella, adaptar sus maniobras a las circunstancias de la vía y de su entorno de una manera eficiente y segura. La importancia de la información visual sobre el total de la información recibida durante la conducción ha sido estimada por algunos autores en un 90% (Alexander et al., 1986).

La distancia de visibilidad es la longitud de la carretera que es visible para el conductor. Para conseguir carreteras seguras, los diseñadores deben proporcionar una distancia de visibilidad suficiente como para permitir a los conductores operar sus vehículos de forma que puedan evitar el impacto con objetos o vehículos inesperados que puedan encontrarse en su camino (AASHTO, 2011).

En relación con los diferentes tipos de maniobras y características propias de la conducción establecidas en las guías de diseño de carreteras, es posible definir diferentes distancias relacionadas con ellas:

- Distancia de parada
- Distancia de adelantamiento
- Distancia de cruce
- Distancia de orientación
- Distancia de decisión
- Distancia de adelantamiento intermedia

Aunque no todas estas distancias son consideradas en todas las guías de diseño geométrico, en caso de que sí lo sean, se establecen en ellas los criterios y sistemáticas de cálculo que permiten cuantificarlas. Una vez conocidas, se establece que las maniobras asociadas no podrán ser practicadas en condiciones de seguridad si el conductor no dispone de una visibilidad igual o superior a ellas.

No es objeto de esta tesis analizar las similitudes y diferencias entre los diferentes procedimientos de cálculo de las distintas guías de diseño, ni la idoneidad de los criterios en que se fundamentan, sin embargo, sí se considera necesario llevar a cabo un breve recorrido por algunas de las normas que puedan resultar representativas en el ámbito internacional, de manera que puedan ponerse en evidencia las diferencias encontradas entre ellas, y en consecuencia, puedan también analizarse las posibles repercusiones que la precisión en la medida de la visibilidad realmente disponible, pueda tener en la aplicación práctica de los resultados obtenidos.

De la revisión normativa anterior se hace evidente que la relación entre las visibilidades disponibles y la seguridad vial es ampliamente aceptada y considerada en el diseño geométrico, no obstante, debido al elevado número de factores que pueden tener incidencia simultánea en un accidente, y a la dificultad de valorarlos de forma

independiente a partir de los datos disponibles, dicha relación no es fácilmente cuantificable (Glennon, 1987; Olson et al., 1984). Los resultados de 20 estudios previos y el posterior análisis llevado a cabo por Olson et al. (1984), mostró, no obstante, una fuerte relación entre distancia de visibilidad y seguridad.

Otros autores han investigado asimismo los efectos que produce una distancia de visibilidad insuficiente sobre la seguridad vial (Fink et al., 1995; Fambro et al., 1997; Caliendo et al., 2007). Además, la frecuencia de colisión resulta estar correlacionada negativamente con la distancia de visibilidad disponible (Sparks, 1968; Sylianov, 1973; Urbanik et al., 1989).

En el ámbito de la ingeniería de carreteras se acepta que una visibilidad insuficiente para la velocidad de operación, es motivo de un mayor riesgo en la ejecución de las maniobras habitualmente practicadas durante la tarea de conducción. Esta circunstancia se traduce en un importante esfuerzo encaminado a obtener diseños geométricos dotados de visibilidad suficiente para estas maniobras.

2.1.1 Distancia de parada y visibilidad de parada

La distancia de visibilidad disponible en una carretera debe ser suficiente como para permitir a un vehículo que viaja a la velocidad de diseño, o próximo a ella, detenerse antes de alcanzar un objeto estacionario ubicado en su camino (AASHTO, 2011).

Es sabido que en curvas horizontales, la visión del conductor puede ser obstruida por obstáculos laterales tales como barreras, árboles, edificios, o taludes de desmonte, mientras que en acuerdos verticales, la visión puede quedar obstruida por la propia curva vertical (Hassan et al., 2000).

El procedimiento de cálculo ampliamente difundido entre las guías de diseño para la determinación de la distancia de parada requerida, se basa en la suma de la distancia recorrida durante el denominado tiempo de percepción-reacción y la distancia de frenado.

La Instrucción de Trazado 3.1 IC española (M^º Fomento, 2000) plantea la formulación para su cálculo expresada en la Ecuación 1.

$$D_p = \frac{V \cdot t_p}{3,6} + \frac{V^2}{254 \cdot (f_l + i)} \quad (1)$$

Donde:

D_p = distancia de parada (m)

V = velocidad (km/h)

f_l = coeficiente de rozamiento longitudinal rueda-pavimento

i = inclinación de la rasante (en tanto por uno)

t_p = tiempo de percepción y reacción (s)

En la Instrucción de Trazado 3.1 IC, la velocidad a considerar en el cálculo de la distancia de parada mínima es la correspondiente a la velocidad de proyecto, mientras que el coeficiente de rozamiento longitudinal a emplear se encuentra tabulado en función de dicha velocidad.

La guía estadounidense establece una formulación similar, también con dos sumandos aunque con el segundo de ellos expresado en términos de tasa de deceleración a (AASHTO, 2011). Su formulación se expresa en la Ecuación 2.

$$d = 0,278Vt + 0,039\frac{V^2}{a} \quad (2)$$

Donde:

d = distancia de parada (m)

V = velocidad de diseño (km/h)

t = tiempo de percepción y reacción (s)

a = tasa de deceleración (m/s²)

Esta formulación es corregida en el caso de que el cálculo se realice considerando una cierta inclinación longitudinal de la rasante (Ecuación 3).

$$d = \frac{V^2}{254\left(\left(\frac{a}{9,81}\right) \pm G\right)} \quad (3)$$

Donde d , V y a tienen el mismo significado anterior, mientras que G representa la inclinación de la rasante expresada en tanto por uno.

La velocidad a emplear en este caso en el cálculo anterior, es la correspondiente velocidad de diseño (km/h).

La normativa francesa (Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 1994), considera también como primer sumando el espacio recorrido durante el tiempo de percepción y reacción, y como segundo, la distancia de frenado. Sin embargo, a diferencia de las guías de diseño española y estadounidense, que consideran en el cálculo la velocidad de proyecto y la velocidad de diseño respectivamente, la normativa francesa implica al percentil 85 de la velocidad de operación. Además, en curvas, esta guía aumenta en un 25% la distancia de parada si el radio en m es mayor que 5 veces la velocidad en km/h, por lo que para una misma velocidad se obtienen dos valores de distancia de parada diferentes según se trate de una recta o de una curva que cumpla las características anteriores (Tabla 1):

Tabla 2: Distancia de visibilidad de parada requerida en recta y en curva. (Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 1994)

V_{85} (km/h)	20	30	40	50	60	70	80	90	100
d_{recta} (m)	15	25	35	50	65	85	105	130	160
D_{curva} (m)	15,5	26,5	40	55	72	95	121	151	187

La guía de diseño colombiana (Ministerio de transporte de Colombia, 2008), emplea la misma fórmula que la AASHTO. La velocidad es la específica del elemento sobre el cual se ejerce la maniobra de frenado. La pendiente se tiene en cuenta a partir del 3% (tanto de subida como de bajada) a través de la misma formulación que da la AASHTO americana.

En la guía de diseño italiana (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2001), se tiene un primer sumando con la distancia recorrida durante el tiempo de percepción-reacción y un segundo sumando con la distancia de frenado, aunque en este caso con ciertas singularidades ya que además de la pendiente y de un coeficiente de frenado, se hace intervenir también a la resistencia aerodinámica y a la resistencia unitaria a la rodadura. La formulación, recogida en la Ecuación 4, es además más generalista, al incluir reducciones de velocidad entre una inicial y otra final no necesariamente nula.

$$D = D_1 + D_2 = \frac{V_0}{3,6} \cdot \tau - \frac{1}{3,6^2} \int_{V_0}^{V_1} \frac{V}{g \cdot [f_l(V) \pm \frac{i}{100}] + \frac{R_a(V)}{m} + r_0(V)} dV \quad (4)$$

Donde:

D_1 = distancia recorrida durante el tiempo de percepción y reacción (m)

D_2 = distancia de frenado (m)

V_0 = velocidad inicial, equivalente a la velocidad de proyecto (km/h)

τ = tiempo de percepción y reacción (s)

V_1 = velocidad final (km/h)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

f_l = coeficiente de frenado

R_a = resistencia aerodinámica (N)

m = masa del vehículo (kg)

i = pendiente longitudinal (en tanto por cien)

r_0 = resistencia unitaria a la rodadura

Del análisis de las guías y formulaciones anteriores se deduce una evidente coincidencia en la necesidad de incluir el primero de los sumandos, de modo que se cuantifique la distancia recorrida durante el tiempo en que el usuario percibe la presencia de un obstáculo en la calzada, procesa la información y decide aplicar los frenos para detener el vehículo, sin embargo, esta coincidencia formulatoria no se traduce en igualdad de resultados, ya que las diferentes normas consideran también valores diferentes para el tiempo de percepción y reacción.

La instrucción española, al igual que la francesa, establecen un tiempo de 2,0 s mientras que la colombiana y la estadounidense lo hacen en 2,5 s, ésta última por considerar que de acuerdo con los estudios previos realizados, 2,5 s es un valor que cubre al 90% de los conductores incluyendo a una buena parte de las personas mayores. La normativa italiana por su parte, considera tiempos de percepción y reacción que no son constantes sino que varían con la velocidad según una formulación entre los 2,6 s correspondientes a 20 km/h y los 1,4 s para 140 km/h. En Nueva Zelanda se han tenido en cuenta también dos tiempos de reacción diferentes, pero considerando que en situaciones de mayor velocidad, los conductores no están en alerta ni preparados para lo inesperado, tomando 2,5 s para velocidades superiores a 70 km/h, mientras que para velocidades menores, el tiempo de reacción es de 2 s.

De hecho las diferencias entre los tiempos de percepción y reacción pueden ser significativas ante diferentes circunstancias tal y como puso de manifiesto Olson et al. (1984) en un estudio que analizaba el tiempo de respuesta de los sujetos como una función de varias variables y en condiciones realistas. El estudio se realizó además como un *estudio sorpresa*, donde el conductor no esperaba tener que tomar la decisión de frenar frente a la presencia de un obstáculo, y como un *estudio advertido*, donde el conductor sabía que tendría que tomar esta decisión y estaba esperando el momento en que surgiera la circunstancia de conducción que le obligara a hacerlo. En un tercer estudio Olson et al. analizaron también el suceso en que los conductores debían soltar el acelerador y apretar el freno lo más rápido posible cuando se encendiera una luz roja situada en la parte delantera del vehículo.

Los tres estudios se realizaron a dos grupos de sujetos: grupo joven (49 sujetos de 40 años o menos) y grupo de mayor edad (15 sujetos de 60 años o más).

Como ejemplo, los datos recogidos para el grupo joven se muestran en la Figura 1, no siendo muy diferentes los resultados obtenidos para el grupo de mayor edad.

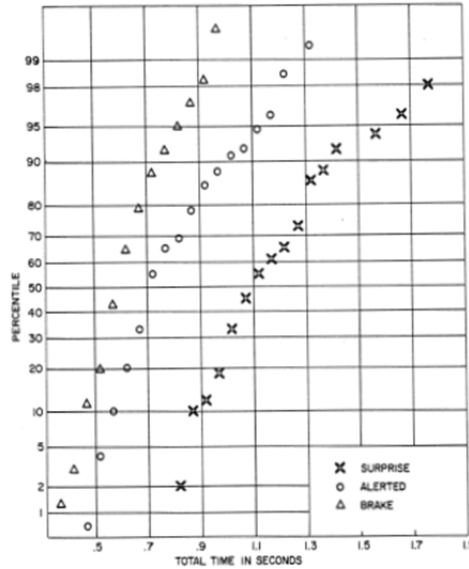


Figura 2: Tiempo de percepción-reacción (Olson et al, 1984)

Los datos más relevantes son los del estudio sorpresa. El valor para un percentil del 95% es 1,6 s. Sin embargo este mismo estudio justifica la adopción de un valor de 2,5 s tal y como adopta finalmente la AASHTO basándose en el hecho de que el estudio se había realizado con sujetos que llevaban menos de una hora conduciendo, que no estaban bajo los efectos de alcohol ni drogas y que, aunque desconocían la existencia del objeto, sabían que estaban siendo controlados, lo que les confiere unas características que pueden no cubrir adecuadamente las circunstancias reales de conducción.

Otros estudios sobre el tiempo de reacción han demostrado que un tiempo de reacción de 2,5 s para la distancia de parada engloba a la mayoría de los conductores, incluyendo aquellos de avanzada edad (Fambro, 1997), (Johansson, 1971) y situándose por encima del percentil 90 de los conductores, si bien es cierto que la media de tiempos de percepción es de 1,27 s (Fambro, 1997).

Respecto del segundo sumando, considerando la maniobra de frenado como movimiento uniformemente decelerado en ambos casos, las diferencias entre los resultados obtenidos por aplicación de las diferentes guías radican en la elección del coeficiente de rozamiento longitudinal o de la tasa de deceleración a considerar para cada velocidad de diseño.

Diversos estudios han revelado que para las características de los pavimentos de Estados Unidos, los conductores emplean unas deceleraciones mayores a 0,56 veces la aceleración de la gravedad g para la detención de los vehículos, si bien el percentil 90 de los mismos se sitúa en 0,34 g (Fambro, 2000), proponiendo un cambio en la normativa estadounidense. Se cree que con este valor, el vehículo puede mantenerse en la

trayectoria y mantener el control del mismo dentro de las capacidades del conductor durante el frenado en condiciones de pavimento húmedas.

En la maniobra de frenado, las características de los vehículos que se han tomado como referencia se remontan a 1940, a pesar de los avances en la industria automovilística (Fambro, 2000).

Como consecuencia de los diferentes tiempos de reacción y de la magnitud del rozamiento longitudinal, los valores de la distancia de parada varían de una guía de diseño a otra, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Distancia de parada según diferentes guías de diseño. Fuente: Fambro y elaboración propia

Distancia de Visibilidad (m).	Tiempo de reacción (s).	Velocidad (km/h)							
		50	60	70	80	90	100	110	120
Alemania	2	-	65	85	110	140	170	210	255
Austria	2	50	70	90	120	-	185	-	275
Colombia	2	54	74	97	123	151	183	217	256
España	2	52	70	93	119	147	179	220	262
EEUU	2,5	65	85	105	130	160	185	220	250
Francia	2	60	65	85	105	130	160	-	-
Inglaterra	2	70	90	120	-	-	215	-	295
Italia	variable	53	69	88	112	136	155	195	234
Nueva Zelanda	2-2,5	54	71	91	114	140	170	205	245

Los países más conservadores y que proporcionan una distancia de parada mayor son Inglaterra y Estados Unidos, mientras que donde se requiere una distancia de parada menor es en Francia, para velocidades menores de 90 km/h, e Italia para velocidades mayores de 90 km/h. Se observa que los valores de la normativa española se mantienen en la media de los restantes. En la Figura 2 se muestra de manera gráfica.

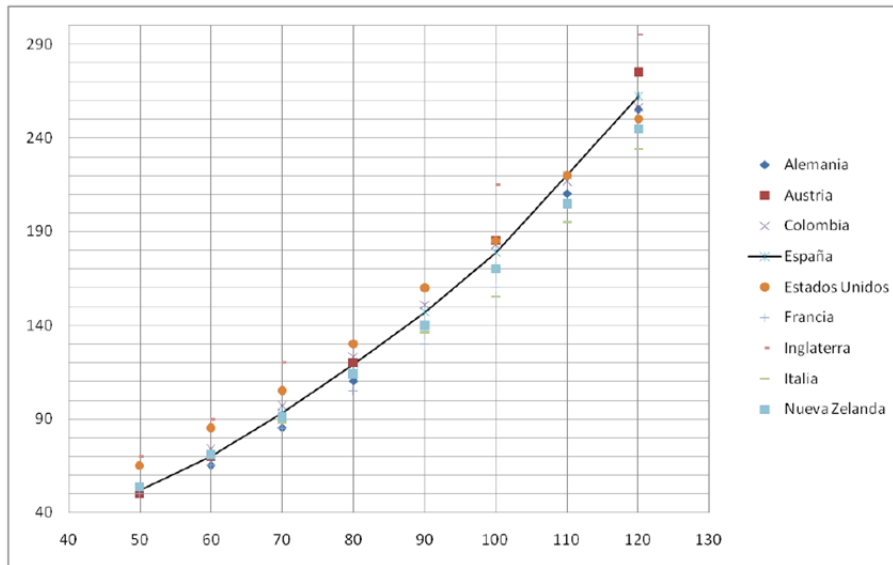


Figura 2: Distancias de parada obtenidas según diferentes guías de diseño. Fuente: elaboración propia

Una vez determinada la distancia de parada, la visibilidad de parada debe ser igual o superior para garantizar una maniobra segura, sin embargo, también varían entre sí los métodos de medición de dicha visibilidad presentes en las diferentes guías de diseño.

Un parámetro esencial en su determinación queda constituido por las alturas consideradas para observador y obstáculo, sobre las cuáles existe también una amplia discusión. Olson et al. (1984), analizaron asimismo el comportamiento de los conductores frente a la presencia de obstáculos inesperados sobre la calzada. En este estudio, la opción elegida por los conductores ante objetos de 10 cm o más era esquivarlos, para alturas menores pasar por encima y en casi ningún caso los conductores optaban por parar. En caso de no poder esquivarlos, por no haber espacio suficiente, los conductores pasaban por encima de los obstáculos de 18 cm de altura o menos.

La vigente Instrucción de Carreteras 3.1 IC establece que la distancia de visibilidad debe ser medida en cada carril siguiendo una línea equidistante a 1,50 m del borde exterior de la calzada, con el observador y el obstáculo situados a 1,10 m y 0,20 m respectivamente, mientras que la AASHTO establece una altura de observador y obstáculo de 1,08 m y 0,60 m respectivamente, midiéndose por el centro del carril, y aceptándose que esta medición pueda ser suficiente realizarla por el centro de la calzada en muchos casos. La guía colombiana coincide en alturas con la española pero sin embargo, no especifica la posición dentro de la calzada en la que debe llevarse a cabo la medición, aunque de los gráficos que se adjuntan se intuye que deba realizarse por el centro del carril en cada sentido de circulación. Actualmente, la norma española se encuentra en fase

de revisión y es de esperar que pueda sufrir modificaciones, al menos, en lo que se refiere a la altura del obstáculo a considerar.

En la guía francesa (Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 1994), la posición del punto de observación será de 1 m de altura, situado transversalmente a 2,00 m del borde derecho de la calzada, mientras que el obstáculo tendrá una altura de 0,35 m (0,15 m para carreteras en las que puedan encontrarse piedras sobre la calzada) y estará ubicado en el eje de la calzada o a 2,00 m del borde derecho de la calzada para simplificar los cálculos.

Por su parte, en la guía italiana (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2001), se establece una altura de los ojos del conductor de 1,10 m y de objeto de 0,10 m, debiendo medirse a lo largo del eje del carril por el que se circula.

Con los ejemplos anteriores se pone de manifiesto que existen similitudes pero también diferencias en los procedimientos de cálculo y en los parámetros empleados que pretenden dotar de cierto margen de seguridad a los resultados y que resultan variables de unas guías a otras, o dicho de otra manera, las diferentes guías contemplan diferentes valores de visibilidad considerados como seguros para la maniobra de detención.

Las consideraciones anteriores resultan importantes a la hora de plantearse las necesidades de precisión requeridas por un sistema de obtención de visibilidades realmente disponibles como el que es objeto de esta investigación.

2.1.2 Distancia de adelantamiento y visibilidad de adelantamiento

En las carreteras que disponen de calzada única y un carril por sentido de circulación, otro tipo habitual de maniobra es el adelantamiento por parte de los vehículos más rápidos, a aquellos que circulan más lentamente. Estas maniobras de adelantamiento deben realizarse ocupando el carril destinado al sentido contrario y para que puedan realizarse con seguridad, el conductor que adelanta debe ser capaz de ver una longitud de carretera suficiente como para completar la maniobra sin interferir con el vehículo adelantado y sin llegar a encontrarse con un vehículo en sentido opuesto (AASHTO 2011).

Al igual que en la distancia de parada, la determinación de la distancia que es necesaria para completar dicho adelantamiento, es asimismo variable entre las diferentes guías de diseño de los distintos países.

En la Instrucción de Trazado 3.1 IC española (Ministerio de Fomento, 2000), para carreteras de nueva construcción se proporciona directamente el valor de distancia de visibilidad de adelantamiento requerida según la velocidad de proyecto de la carretera Tabla 3. El diseño debería intentar garantizar una visibilidad superior a ésta en al menos un 40% del trazado, debiendo conseguirse de la manera más uniformemente repartida posible.

Tabla 3: Distancia de visibilidad de adelantamiento requerida en función de la velocidad de proyecto. (Ministerio de Fomento, 2000).

V_p (km/h)	40	50	60	70	80	90	100
D_a (m)	200	300	400	450	500	550	600

En la guía de diseño francesa (Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 1994), la distancia de visibilidad de adelantamiento requerida viene definida para carreteras de doble sentido o con tercer carril no asignado a ningún sentido, como un valor constante de 500 m que no tiene en cuenta la velocidad de la carretera.

Por su parte, a diferencia de las anteriores, la guía de diseño estadounidense (AASHTO, 2011) analiza en mayor profundidad la maniobra de adelantamiento, obteniéndola como la suma de las siguientes cuatro distancias que responden al esquema de adelantamiento mostrado en la Figura 3:

- D1: Distancia recorrida durante el tiempo de percepción y reacción y durante la aceleración inicial hasta el punto de intrusión en el carril opuesto.
- D2: Distancia recorrida mientras el vehículo que adelanta ocupa el carril opuesto.
- D3: Distancia que queda entre el vehículo que ha adelantado y el vehículo que viene en sentido contrario cuando el primero ha vuelto al carril derecho.
- D4: Distancia recorrida por el vehículo que circula en sentido contrario durante un tiempo igual a dos tercios del tiempo que el vehículo que adelanta invierte en ocupar el carril opuesto, o $2/3$ de D2.

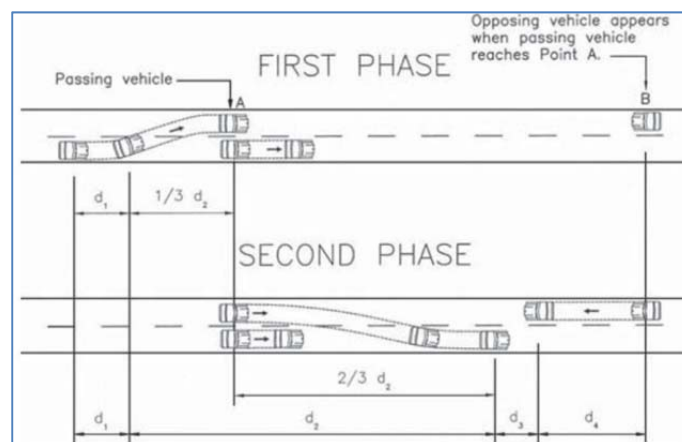


Figura 3: Fases del adelantamiento y sumandos considerados en la determinación de la distancia de visibilidad de adelantamiento requerida según la AASHTO, 2011.

La Figura 4 muestra los valores resultantes de aplicar los cuatro sumandos anteriores para diferentes velocidades del vehículo que adelanta y que son determinados a partir de la velocidad de los tres vehículos implicados, las aceleraciones que alcanzan y los tiempos que pasan en cada carril.

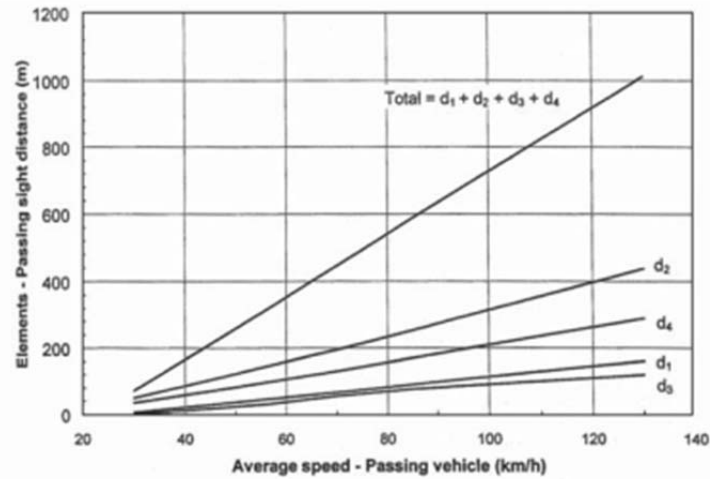


Figura 4: Distancias empleadas en cada una de las fases del adelantamiento y distancia total (AASHTO, 2011).

Esta misma forma de proceder, basada en los cuatro sumandos anteriores, es asumida también por la guía de diseño colombiana (Ministerio de Transporte de Colombia, 2008), cuyos resultados son tabulados para diferentes velocidades del vehículo que adelanta y del vehículo adelantado, tal y como puede observarse en la Tabla 4.

Tabla 4: Distancia de visibilidad de adelantamiento (Ministerio de Transporte de Colombia, 2008)

VELOCIDAD ESPECÍFICA DE LA ENTRETANGENCIA HORIZONTAL EN LA QUE SE EFECTÚA LA MANIOBRA V_{ETH} (km/h)	VELOCIDAD DEL VEHÍCULO ADELANTADO (km/h)	VELOCIDAD DEL VEHÍCULO QUE ADELANTA, V (km/h)	MÍNIMA DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE ADELANTAMIENTO D_A (m)	
			CALCULADA	REDONDEADA
20 ¹	-	-	130	130
30	29	44	200	200
40	36	51	266	270
50	44	59	341	345
60	51	66	407	410
70	59	74	482	485
80	65	80	538	540
90	73	88	613	615
100	79	94	670	670
110	85	100	727	730
120	90	105	774	775
130	94	109	812	815

¹ Valor obtenido por extrapolación

En la guía de diseño italiana (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2001), la distancia de visibilidad de adelantamiento se evalúa mediante la formulación expresada en la Ecuación 5.

$$D_s = 20 \times v = 5,5 \times V \quad (5)$$

Donde:

D_s es la distancia de adelantamiento en m,

y “ v ” (m/s) o “ V ” (km/h) es la velocidad atribuida tanto al vehículo al que se adelanta como al vehículo que se aproxima en sentido contrario.

En la Figura 5 pueden observarse los diferentes valores obtenidos para las distintas guías de diseño analizadas, poniendo de manifiesto de nuevo, y tal y como también ocurría en la determinación de la distancia de visibilidad de parada, que no existe ni un criterio, ni un resultado único para todas ellas.

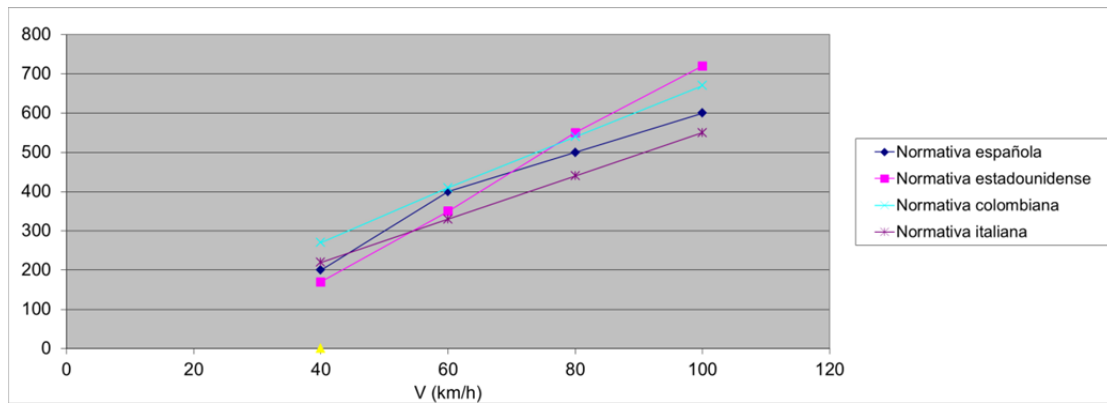


Figura 5: Distancias de visibilidad de adelantamiento obtenidas según diferentes guías de diseño geométrico (elaboración propia).

La forma de medir la visibilidad de adelantamiento tampoco es única. Según la guía de diseño española, se considerará como visibilidad de adelantamiento la distancia que existe a lo largo del carril por el que se realiza el mismo entre el vehículo que efectúa la maniobra de adelantamiento y la posición del vehículo que circula en sentido opuesto, en el momento en que puede divisarlo, sin que luego desaparezca de su vista hasta finalizar el adelantamiento y considerando como alturas, tanto del observador, como del vehículo del sentido opuesto, de 1,10 m sobre la calzada. A efectos de diseño geométrico, en carreteras de dos sentidos y una sola calzada, se procurará obtener la máxima longitud posible en que la distancia de visibilidad de adelantamiento disponible sea superior a la distancia de adelantamiento requerida. La proporción deseable en la que esto ocurra, será del cuarenta por ciento (40%) por cada sentido de circulación y lo más uniformemente repartida posible.

En la guía de diseño francesa sin embargo, se establece que la distancia de visibilidad de adelantamiento disponible se mida entre el punto de observación situado en el eje de la carretera y a una altura de 1 m sobre la calzada y el punto observado, situado

en el eje de la calzada para 3 carriles, y en el eje del carril izquierdo para 2 carriles (para simplificar los cálculos manuales se puede tomar el eje de la calzada), a una altura de 1m sobre ella. En la concepción geométrica de la carretera, se recomienda que en el 25% del trazado haya 500 m de visibilidad para permitir el adelantamiento, y se justifica diciendo que con distancias de visibilidad de 500 m se obtiene un porcentaje apreciable de situaciones (30-50%) con visibilidad mutua de los vehículos y con adelantamiento seguro, siendo más que suficiente en carreteras de baja velocidad. En esta guía, también se citan los elementos que pueden dificultar la visibilidad disponible en adelantamientos: paneles, muros de contención, árboles, cultivos, vegetación, edificios, estructuras, muros, etc; aunque no se analiza su incidencia, ni se determina cómo deben considerarse en la visibilidad realmente disponible.

Por su parte, en la AASHTO (2011), la distancia de visibilidad de adelantamiento disponible debe medirse tomando la altura tanto del observador como del punto observado a 1,080 m de altura sobre el pavimento. Esta altura del objeto se basa en una altura del vehículo de 1.330 mm, que representa el percentil 15 de las alturas de los vehículos en el parque de turismos analizados por la AASHTO, menos una asignación de 250 mm, que sirve para que el conductor reconozca al vehículo como tal. La distancia de visibilidad de adelantamiento disponible debe medirse desde la mitad de un carril a la mitad del otro carril, aunque se indica que en las carreteras de dos carriles, tal refinamiento generalmente no es necesario, pudiendo considerarse adecuada la medición de la distancia a lo largo del eje central de la carretera. A efectos de diseño geométrico, la AASHTO no impone valores mínimos en los que la visibilidad sea superior a la distancia de adelantamiento requerida, en tanto en cuanto esta circunstancia puede afectar de forma muy notable al coste de la infraestructura.

En la Normativa colombiana (Ministerio de transporte de Colombia, 2008), en la maniobra de adelantamiento la altura del punto de vista del conductor que debe considerarse, medida sobre la superficie del pavimento, debe ser de 1,10 m, mientras que la altura del objeto observado, que se considera que cubre la altura de la mayoría de los autos, debe situarse a 1,35 m sobre la calzada. En este caso, no se indica la posición de la línea de referencia para realizar la medición dentro de la sección transversal. Según esta guía, las carreteras de nuevo trazado deben proyectarse de manera que en tramos de cinco kilómetros, se tengan varios subtramos con visibilidad superior a la distancia de adelantamiento requerida, con ciertos porcentajes recomendados (Tabla 5).

Tabla 5: Porcentaje recomendado con visibilidad superior a la distancia de adelantamiento según la guía de diseño del Ministerio de Transporte de Colombia, 2008.

VELOCIDAD DE DISEÑO DEL TRAMO HOMOGÉNEO V_{TR} (km/h)	20-50	60-80	90-100
PORCENTAJE MÍNIMO DE LA LONGITUD CON DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE ADELANTAMIENTO (%)	20%	30%	40%

Según la normativa italiana (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2001), la distancia de visibilidad de adelantamiento disponible se medirá con altura del punto de vista del conductor de 1,10 m y altura del obstáculo también de 1,10 m. Se medirá del eje de un carril al eje del carril del sentido contrario. En esta guía se indica que, en carreteras interurbanas de una calzada y doble sentido de circulación, se debe garantizar la visibilidad de adelantamiento lo máximo posible en relación con el flujo de tráfico y con el nivel de servicio, y nunca en menos del 20% del trazado.

Puede observarse por tanto, la dispersión de resultados y de exigencias que afectan a la distancia de visibilidad de adelantamiento, lo que a su vez se traduce en diferentes incidencias en el diseño geométrico final y en el coste de ejecución de la carretera, de manera que, asumido un mayor coste de construcción justificado por la consecución de un determinado porcentaje de vía donde la visibilidad sea superior a la distancia de adelantamiento considerada, esta circunstancia no debería perderse por un inadecuado control de las condiciones de visibilidad durante el período de explotación de la carretera.

2.1.3 Distancia de cruce y visibilidad de cruce

En las carreteras en las que la maniobra de cruce esté permitida, es necesario ubicar estos cruces en puntos del trazado que dispongan de la adecuada visibilidad, tanto por parte del conductor que circula por la vía principal, como de aquel que pretende realizar la maniobra de cruce (visibilidad recíproca).

A pesar de que no todas las guías de diseño geométrico consideran este concepto de visibilidad como tal, algunas de ellas sí hacen mención expresa, proponiendo en ese caso una sistemática de cálculo y medición. Así por ejemplo, de la Instrucción de Trazado española 3.1 IC (Fomento, 2000) define la distancia de cruce como la distancia recorrida por un vehículo que circula por una vía preferente durante el tiempo que otro tarda en cruzar dicha vía.

De acuerdo con esta definición, la distancia de cruce se calcula según la Ecuación 6 atendiendo a la velocidad a la que circula el vehículo por la vía principal y al tiempo que otro vehículo invierte en cruzar por completo dicha vía:

$$D_c = \frac{V \cdot t_c}{3,6} \quad (6)$$

siendo:

D_c = distancia de cruce (m)

V = velocidad de la vía preferente (km/h). En la guía de diseño española, para la determinación de la distancia de cruce mínima, esta velocidad es igual a la velocidad de proyecto de dicha vía.

t_c = tiempo que se tarda en cruzar la vía preferente (s)

Para determinar el tiempo t_c se tiene en cuenta tanto el tipo de vehículo que realiza la maniobra de cruce, su aceleración y dimensiones, como el tiempo de percepción y reacción, la posición del vehículo respecto al borde de la calzada y la anchura de la misma. A partir de estos parámetros, si se considera la maniobra como si de un movimiento uniformemente acelerado se tratara partiendo del reposo, el tiempo total invertido se obtiene a partir de la Ecuación 7.

$$t_c = t_p + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot (3 + l + w)}{9,8 \cdot j}\right)} \quad (7)$$

Donde:

t_p = tiempo de reacción y percepción del conductor, en segundos. En la guía de diseño española se adoptará siempre un valor constante e igual a dos segundos ($t_p = 2s$).

l = longitud en metros del vehículo que atraviesa la vía preferente. Se considerarán los siguientes valores en función del tipo de vehículo que cruce:

- $l = 18$ m para vehículos articulados.
- $l = 10$ m para vehículos pesados rígidos.
- $l = 5$ m para vehículos ligeros.

w = anchura del total de carriles de la vía principal (m)

j = aceleración del vehículo que realiza la maniobra de cruce, en unidades g, siendo g la aceleración de la gravedad. En la Instrucción 3.1 IC se tomará un valor de: $j = 0,15$ para vehículos ligeros, $j = 0,075$ para vehículos pesados rígidos y $j = 0,055$ para vehículos articulados.

Este mismo planteamiento y formulación es el empleado también en la guía de diseño colombiana (Ministerio de transporte de Colombia, 2008) con ligeras modificaciones sobre la longitud a considerar en los vehículos pesados rígidos y articulados (11,00 y 20,89 m respectivamente) y en el tiempo de percepción y reacción (2,5 s). Tampoco la velocidad introducida en el cálculo se corresponde con la velocidad de proyecto, sino que en cada elemento geométrico debe adoptarse su correspondiente velocidad específica, lo que consecuentemente, supone también valores diferentes de distancia de cruce a lo largo de un mismo tramo. Las tasas de aceleración de los vehículos que cruzan son, sin embargo, las mismas que las establecidas en la guía española, como también lo es la distancia a la que se encuentran estos vehículos del borde de la calzada (3,0 m).

Existen, sin embargo, otros criterios a la hora de considerar la maniobra de cruce en el diseño de carreteras. La guía estadounidense por ejemplo (AASHTO, 2011), no considera el cruce como una maniobra de características especiales que deba ser considerada en el diseño de forma independiente. En su lugar, establece que la distancia de visibilidad de parada que debe garantizarse en todo el trazado, permitirá también la

detención en condiciones de seguridad en caso de que un vehículo se encuentre invadiendo la calzada principal. Obviamente, este planteamiento resulta sensiblemente menos conservador que el establecido en las guías española y colombiana.

La guía de diseño francesa (Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 1994), simplifica el cálculo planteando valores determinados de tiempo total a considerar en función del tipo de vía. Este tiempo, multiplicado por la velocidad V_{85} de la vía principal determina la distancia de visibilidad necesaria hasta el punto de cruce. La consideración de la velocidad V_{85} es un avance interesante sobre la mera consideración de la velocidad de proyecto e incluso sobre la consideración de las velocidades específicas, sin embargo, no considera diferentes características geométricas transversales de la vía a cruzar ni de aceleración del vehículo que realiza la maniobra de cruce.

Esta misma forma de proceder se encuentra considerada en la normativa italiana (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2001), siendo el tiempo considerado constante e igual a 9,5 segundos y la velocidad la correspondiente al tramo en que se realice el cálculo.

Al igual que en los casos de parada y adelantamiento, la forma en que debe procederse a la medición de la visibilidad de cruce disponible, resulta asimismo variable entre las distintas guías de diseño.

Así en las guías española (Fomento, 2000) y colombiana (Ministerio de transporte de Colombia, 2008), se establece un triángulo de visibilidad definido entre la posición del vehículo que circula por la vía preferente y el que pretende realizar el cruce tal y como se muestra en la Figura 6, de modo que se asegure que no existen objetos que puedan obstaculizar la visión en estas áreas. En la Instrucción 3.1 IC se establece además que la medición se realice siguiendo el eje del carril con una altura de observador de 1,10 m, sin que se especifique sin embargo, la correspondiente al vehículo observado. Por su parte, en la guía colombiana no se indica la línea sobre la que se debe medir, ni tampoco las alturas de observador y obstáculo que deben considerarse en este caso.

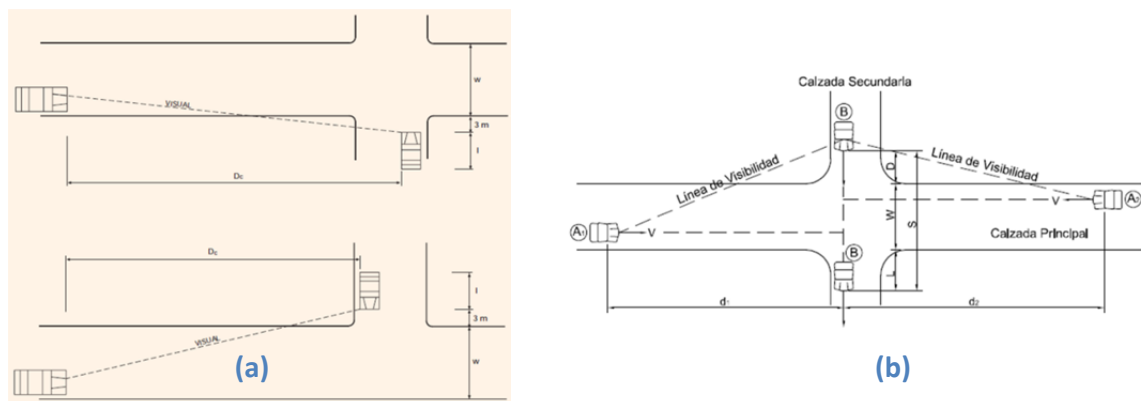


Figura 6: Esquemas de visibilidad de cruce establecidos en las guías de diseño española (a) y colombiana (b).

En la guía francesa (Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 1994), la visibilidad disponible debe medirse sobre el eje del carril en carreteras de sentido único, o sobre el eje de la calzada en carreteras de doble sentido de circulación con alturas de observador y obstáculo de 1,0 m, y con el vehículo que pretende realizar la maniobra de cruce situado a 4,0 m del borde de la calzada.

En la guía de diseño italiana (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2001) la medición se realizará siguiendo el eje del carril de la vía principal indicándose que se debe ver el límite más lejano del carril adyacente al del vehículo que pretende realizar la maniobra de cruce pero sin especificar alturas de observador y objetivo sobre la calzada.

Por tanto, supuesta conocida la velocidad para la que se determinan las distancias de cruce (ya sea velocidad de proyecto, velocidad específica o V_{85}), como consecuencia de los distintos criterios establecidos, se hacen patentes importantes diferencias en los resultados (Figura 7), lo que pone de manifiesto de nuevo las distintas consideraciones sobre el umbral de seguridad a considerar.

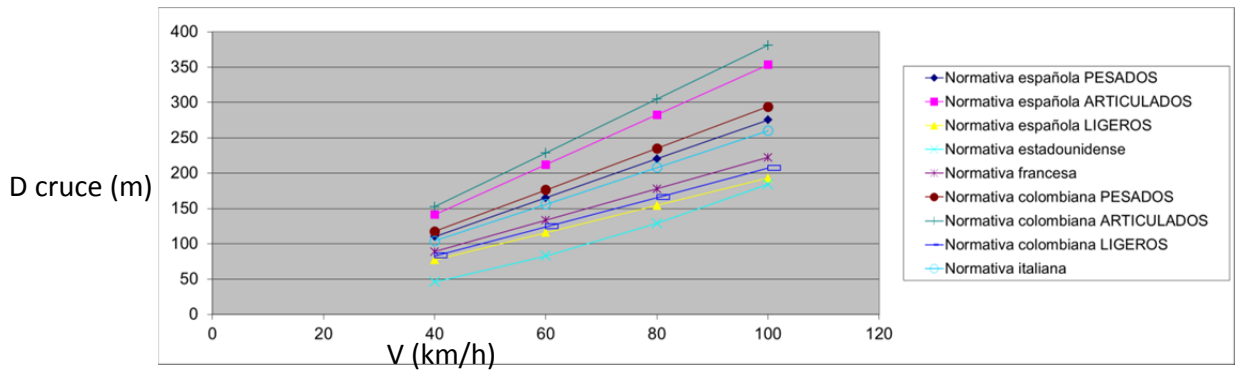


Figura 7: Distancias de visibilidad de cruce obtenidas según diferentes guías de diseño geométrico (fuente: elaboración propia)

2.1.4 Distancia de orientación y visibilidad de orientación

Las definiciones específicas de distancia y visibilidad de orientación no se encuentran recogidas en todas las guías de diseño geométrico de carreteras, sin embargo, se trata de un concepto que por su interés, merece ser tenido en consideración. Este tipo de visibilidad se vincula a la legibilidad de la vía, uno de los factores que incluye la PIARC en su Manual de Seguridad (2003).

La distancia de visibilidad de parada suele ser suficiente para permitir a la mayoría de los conductores realizar una maniobra de detención en circunstancias normales, sin embargo, estas distancias suelen ser insuficientes cuando los conductores deben tomar decisiones complejas o instantáneas, cuando la información es difícil de percibir o cuando las maniobras inesperadas o inusuales son obligatorias (AASHTO, 2011).

Según la guía de diseño estadounidense (AASHTO, 2011), la distancia de orientación (decision sight distance) es la distancia que se necesita para que un conductor detecte algo inesperado, una fuente de información difícil de percibir, o el estado de la carretera en un entorno que puede ser visualmente desordenado, reconocer su condición o su amenaza potencial, seleccionar una velocidad apropiada a la ruta, e iniciar y completar la maniobra con seguridad y eficacia.

De acuerdo con esta concepción, la distancia de orientación ofrece a los conductores un margen adicional para el error y les otorga una longitud suficiente para maniobrar sus vehículos a la misma velocidad o menor en lugar de simplemente parar, por lo que sus valores son sustancialmente mayores que la distancia de parada (AASHTO, 2011).

Ejemplos de lugares críticos donde este tipo de errores pueden producirse, y donde es deseable proporcionar distancia de orientación son: lugares de intercambio y cruce, cambios en la sección transversal (tales como zonas de peaje), y zonas con "ruido visual" donde compiten varias fuentes de información tales como elementos de la carretera, tráfico, dispositivos de control de tráfico y señales o carteles publicitarios (AASHTO, 2011).

Según la maniobra a realizar y el tipo de carretera (rural, urbana, suburbana), en la normativa estadounidense (AASHTO, 2011), se dan los valores del tiempo de orientación con el que calcular la distancia de visibilidad de orientación. Este tiempo varía entre 3 y 9,1 s, y la distancia de visibilidad de orientación requerida calculada se compara con la visibilidad disponible, medida de la misma forma que la visibilidad de parada (altura del punto de vista del conductor a 1080 mm y altura del objeto a 600 mm), admitiéndose que la medición que se realice pueda serlo por el eje de la carretera o por el eje del carril.

2.1.5 Distancia de decisión y visibilidad de decisión

Gattis et al. (1995), introdujeron por primera vez el concepto de distancia de decisión. Este concepto, está relacionado con la distancia de orientación y se basa en la asunción de que el conductor debe percibir a través de la vista la información de las características geométricas de la carretera de modo que pueda guiar y controlar el vehículo. El conductor necesita una mínima distancia de operación para responder al trazado que se le presenta por delante.

Una carretera cuya geometría se ha proyectado para una determinada velocidad de diseño, de acuerdo con los estándares comúnmente aceptados en las guías, dispondrá en muchos casos de amplias distancias de visibilidad de decisión (preview sight distance, PVSD), sin embargo, una carretera con características geométricas deficientes podría disponer de insuficiente distancia de visibilidad de decisión.

En relación con este concepto, es de esperar que durante la conducción los conductores que se aproximan a una curva horizontal desde una recta tangente, reduzcan la velocidad de operación practicada en la recta hasta la velocidad de operación de la curva. Para ello, los conductores deben ser capaces de percibir la existencia de la curva y decelerar con una tasa de deceleración confortable antes de la entrada en el tramo circular. Gattis et al., (1995) obtuvieron las ecuaciones necesarias para calcular la distancia de decisión disponible en un acuerdo vertical convexo, discutiendo además la aplicación de este concepto cuando en planta se encuentra además una curva horizontal cerrada.

En la Figura 8 puede observarse la distancia de decisión disponible medida según dos componentes S_1 y S_2 que corresponden al tramo recto y curvo en planta en presencia de un acuerdo convexo de puntos de tangencia inicial y final BVC y EVC. En los casos en que se de esta coincidencia de alineaciones en planta y alzado, deberían adoptarse medidas adicionales de guiado del conductor mediante señalización o marcas viales.

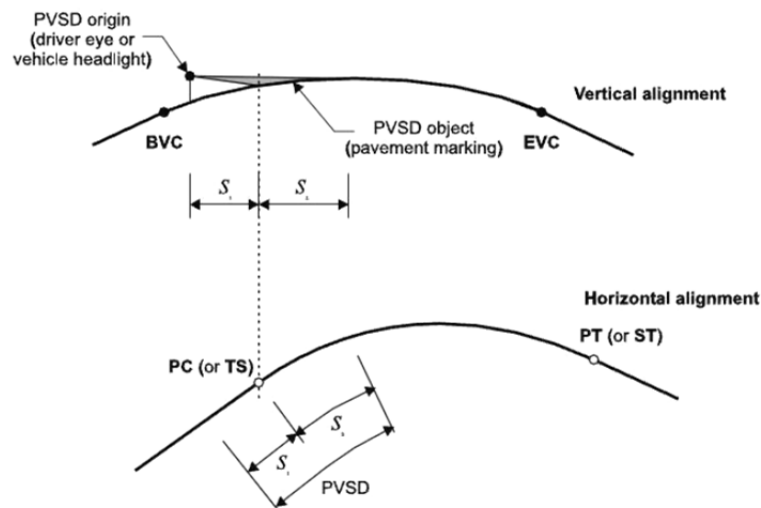


Figura 8: Distancia de visibilidad de decisión (PVSD), Gattis et al., 1995

Este concepto, que no se encuentra recogido en la vigente guía de diseño española, sí aparece por ejemplo en la normativa francesa en un apartado específico de visibilidad de una curva (visibilité sur un virage), donde se especifica esta distancia de visibilidad debe ser la correspondiente a al menos 3 segundos recorridos a la velocidad V_{85} del punto en el que se realice el cálculo (Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 1994).

2.1.6 Distancia de visibilidad nocturna

En ausencia de iluminación ambiental, la visibilidad nocturna (Headlight Sight Distance) se ve condicionada tanto por la propia geometría de la carretera y la presencia de obstáculos, como por el alcance y configuración de la luz arrojada por los faros de los vehículos sobre la carretera y sobre el entorno próximo.

Uno de los motivos más evidentes de obstrucción de la luz de los faros lo constituyen los acuerdos verticales. El hecho de que los faros se encuentren habitualmente montados por debajo del punto de vista del conductor puede hacer que ciertos obstáculos, que serían visibles en condiciones diurnas, se encuentren en la sombra en condiciones nocturnas. Faros demasiado bajos pueden no ser capaces de revelar objetos de forma fiable (Olson, 1984).

Para el diseño de curvas verticales, se admite de forma general en las guías de diseño geométrico que las características de los acuerdos verticales convexos se determinen en condiciones de circulación diurnas, determinando el parámetro que garantiza una determinada distancia de visibilidad de parada, adelantamiento o decisión. Sin embargo, es asimismo aceptado en dichas guías, que las características geométricas de los acuerdos verticales cóncavos queden determinadas por las condiciones de circulación nocturna y no diurnas, de modo que, contando con una determinada altura de faros de un vehículo tipo y con una determinada geometría del cono de luz proyectado, la longitud de la curva de acuerdo sea tal que proporcione también una visibilidad igual o superior a la distancia de visibilidad de parada (Easa et al., 1997).

En cualquier caso, las limitaciones a la visibilidad impuestas a la conducción nocturna por los acuerdos verticales, no son las únicas presentes de noche. La existencia de obstáculos laterales fue también analizada en el estudio llevado a cabo por Easa et al. en 1997. En este estudio, las obstrucciones laterales tales como un edificio o un árbol, podían ser representadas por un único punto (obstrucciones individuales), mientras que las obstrucciones que son continuas a lo largo de un segmento específico, como por ejemplo un talud de desmonte, debían ser representadas por una línea, (obstrucciones continuas). Tomando como aproximación de los faros del vehículo un solo punto a lo largo de la línea central del carril de circulación Easa et al., 1997 realizaron un análisis simplificado del que se obtendría una distancia de visibilidad conservadora.

De acuerdo con este estudio, la distancia de visibilidad nocturna disponible en la alineación horizontal está limitada por el ángulo de propagación de luz horizontal " α ", tal y como se muestra en la Figura 9a. Las obstrucciones laterales pueden limitar el ángulo efectivo de la luz horizontal extendido a un valor menor que " α ", como se muestra en la Figura 9b. En el caso de obstrucción continua, se determinará (α_2) y se comparará con (α) (Figura 10).

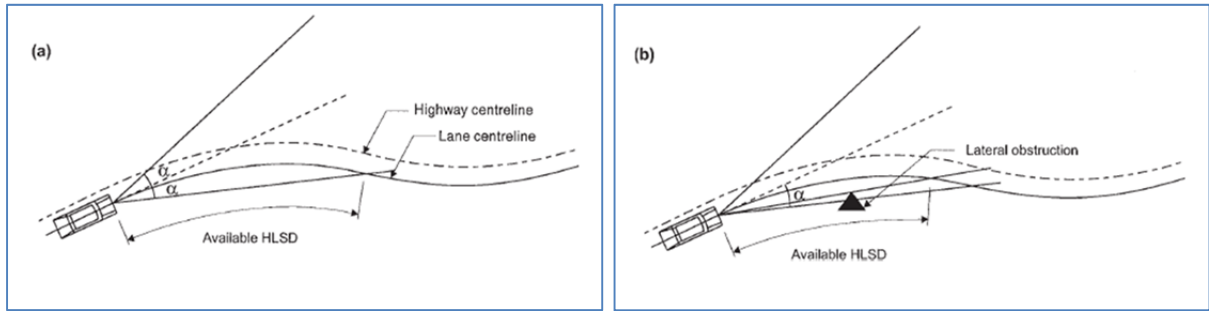


Figura 9. Distancia de visibilidad nocturna disponible sin obstrucción lateral (a) y con obstrucción lateral (b). (Easa et al., 1997)

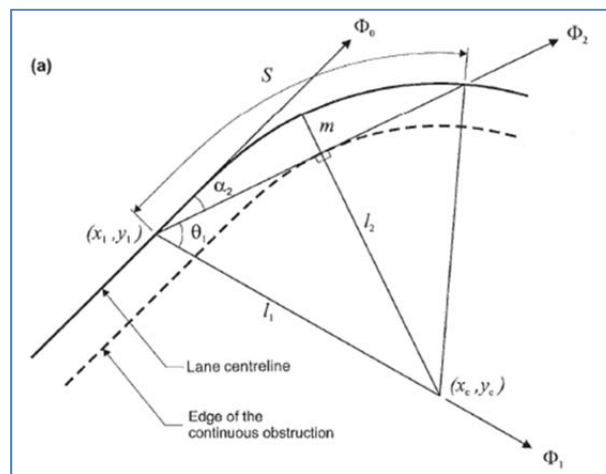


Figura 10. Distancia de visibilidad nocturna con obstrucción continua. (Easa et al., 1997)

Teniendo en cuenta el ángulo “ α ” dado por los faros del vehículo, la velocidad “ V ” de circulación de la vía y la distancia de visibilidad requerida de parada, Easa et al. crearon unas gráficas para el diseño del despeje lateral mínimo y el radio mínimo de las curvas horizontales. Las gráficas para $\alpha = 20^\circ$ y $\alpha = 10^\circ$ se muestran en la Figura 11, y ponen de manifiesto como la presencia de obstáculos laterales pueden provocar inadecuadas distancias de visibilidad nocturnas relacionadas con este ángulo del haz de luz. Estas gráficas representan el despeje y radio necesarios para cada velocidad de diseño y su correspondiente distancia de visibilidad requerida, sombreando aquella parte del gráfico que arroja inadecuadas distancias de visibilidad nocturnas para un determinado valor de α . En el ejemplo representado en la Figura 11, una curva de radio 500 m requiere un despeje lateral de 10 m con una adecuada distancia de visibilidad nocturna para $\alpha = 20^\circ$, sin embargo, si α se reduce hasta los 10° , los valores anteriores ya no garantizan una adecuada distancia de visibilidad nocturna. En este último caso es necesario incrementar el radio de la curva hasta los 585 m, siendo entonces suficiente con un despeje de 8,6 m (punto c).

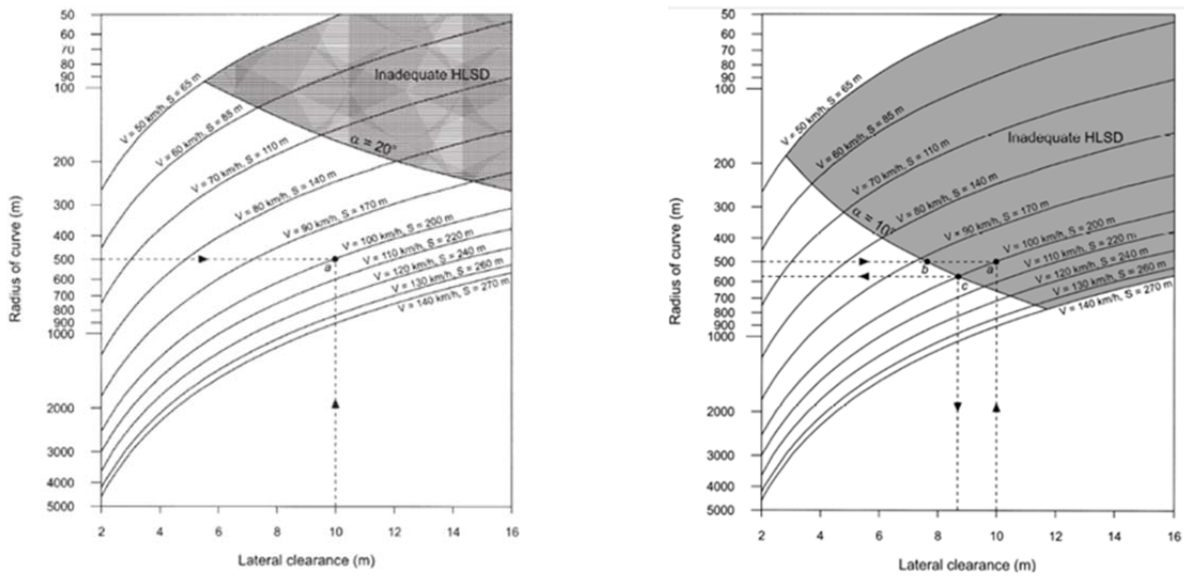


Figura 11. Relación entre radio y despeje lateral mínimo para $\alpha = 20^\circ$ y $\alpha = 10^\circ$. (Easa et al., 1997)

Los análisis anteriores superan la mera consideración del efecto en la visibilidad nocturna de los acuerdos verticales y también tienen sus consecuencias en la búsqueda de una adecuada geometría en planta y sección transversal, sin embargo, no se encuentran incluidos de forma generalizada en las guías de diseño.

El procedimiento de cálculo que sí se encuentra recogido en las guías de diseño geométrico para el dimensionamiento de los acuerdos cóncavos, presenta una base conceptual común, aunque con ciertas variaciones.

Así la Instrucción de Trazado 3.1 IC española (Ministerio de Fomento, 2000), plantea curvas de acuerdo vertical cóncavas de tipo parabólico, cuyo parámetro K_v se obtiene a partir de la Ecuación 8.

$$K_v = \frac{D^2}{2 \cdot (h - h_2 + D \cdot \operatorname{tg} \alpha)} \quad (8)$$

Donde:

K_v = parámetro de la parábola (m)

h = altura de los faros del vehículo (m)

h_2 = altura del objeto sobre la calzada (m)

α = ángulo que el rayo de luz de mayor pendiente del cono de luz forma con el eje longitudinal del vehículo

D = visibilidad requerida (m)

siendo los valores $h_1 = 0,75$ m, $h_2 = 0,20$ m y $\alpha = 1^\circ$ los adoptados en este caso, y la distancia de visibilidad requerida, la correspondiente a la distancia de visibilidad de parada.

La guía estadounidense (AASHTO, 2011) adopta también un valor del ángulo que el rayo de mayor pendiente del cono de luz forma con el eje longitudinal del vehículo, de 1° , mientras que la altura de los faros resulta más conservadora, estableciéndola en 0,6 m. La distancia de visibilidad requerida es también la distancia de visibilidad de parada.

La formulación en este caso es diferente si el alcance del haz de luz es inferior o superior a la longitud del acuerdo. Si es inferior, la Ecuación 9 expresa la relación.

$$L = \frac{A \cdot S^2}{200 [0,6 + S \cdot \text{tg } 1^\circ]} \quad (9)$$

Donde:

L = longitud de la curva vertical (m)

S = distancia de alcance del haz de luz (m)

A = diferencia algebraica de pendientes (en %)

Si S es mayor que L , entonces la ecuación anterior se reformula de acuerdo con la expresión de la Ecuación 10.

$$L = 2 \cdot S - \frac{200 \cdot [0,6 + S \cdot \text{tg } 1^\circ]}{A} \quad (10)$$

Las guías de diseño colombiana (Ministerio de transporte de Colombia, 2008) e italiana (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2001), emplean formulaciones equivalentes a la de la AASHTO con el mismo ángulo de divergencia del haz de luz y con altura de faros 0,6 y 0,5 m respectivamente.

La normativa francesa sin embargo, no hace mención expresa a las condiciones de visibilidad nocturnas para el establecimiento del radio de las curvas circulares empleadas en la transición de rasantes rectas.

2.2 MODELOS DE CÁLCULO DE VISIBILIDADES

La importancia de las visibilidades disponibles en las principales maniobras de conducción ha motivado su consideración como parte fundamental del diseño geométrico de carreteras.

El cálculo de visibilidades en fase de proyecto puede llevarse a cabo mediante diferentes modelos, cada uno de ellos con unas características, limitaciones y precisiones propias. Con el fin de conocer su aplicabilidad a carreteras existentes, los fundamentos generales de las técnicas empleadas en la obtención de visibilidades son objeto de análisis en los apartados posteriores.

2.2.1 Modelos bidimensionales

La compleja realidad geométrica de las carreteras ha sido simplificada y abordada en ingeniería civil mediante la consideración del diseño en planta, alzado y sección transversal de forma separada, pero con ciertas reglas de coordinación para garantizar un adecuado resultado tridimensional.

Los modelos bidimensionales de cálculo de las visibilidades disponibles se basan en el análisis de cada una de estas componentes del diseño y en particular en el análisis independiente de la planta, a la que podrá añadirse cierta información procedente de la sección transversal, y del alzado, donde se tendrá en cuenta la variación de cota de la rasante en el eje de referencia del diseño. Es fácil de entender sin embargo, que la propia simplificación empleada en el modelo de diseño, y la no consideración conjunta de los alineamientos horizontal y vertical junto con la correspondiente sección transversal, disminuye la precisión de los resultados de visibilidad obtenidos (Jha et al., 2009).

Ejemplo de esta consideración bidimensional lo constituyen los procedimientos establecidos en algunas guías de diseño para obtener visibilidades a partir de los planos de proyecto. Este es el caso de la norteamericana (AASHTO, 2011), o la colombiana (Ministerio de transporte de Colombia, 2008).

En estos procedimientos, la sistemática de obtención de la visibilidad disponible por planta es un proceso gráfico en el que a partir de los planos, se trazan visuales rectas entre los puntos de observación y obstáculo establecidos de acuerdo con las guías de diseño. De las visuales trazadas a intervalos constantes y con incrementos de distancia decididos por el proyectista, se obtienen los despejes requeridos. De forma simplificada, la presencia de taludes de excavación en curvas es representada mediante una línea que recoge la ubicación geométrica en planta de los puntos del talud situados a una altura equivalente a la altura media de observador y obstáculo. (Figura 12, Ministerio de Transporte de Colombia, 2008 y Figura 13, AASHTO, 2011).

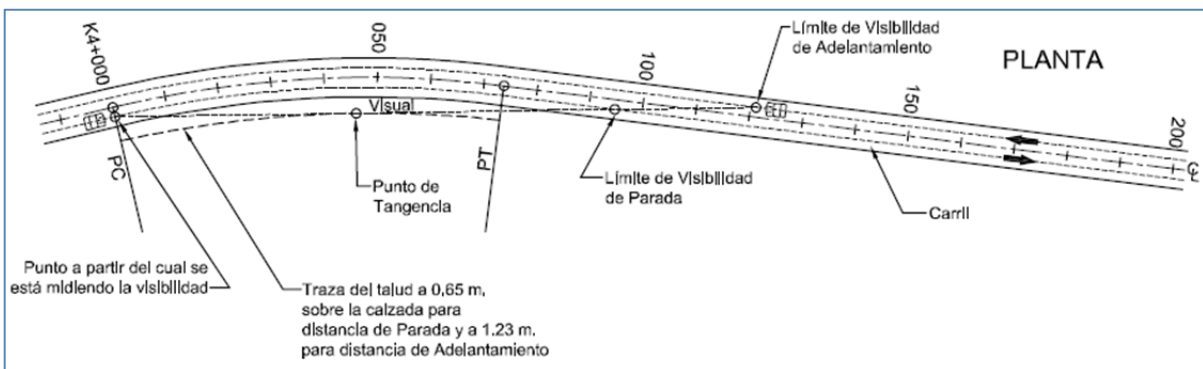


Figura 12. Obtención de visibilidad de parada y adelantamiento a partir de un plano de planta (Ministerio de Transporte de Colombia, 2008)

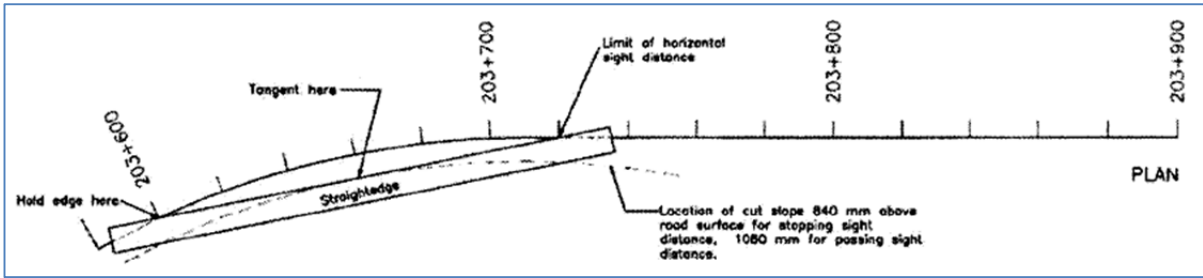


Figura 13. Obtención de visibilidad de parada y adelantamiento a partir de un plano de planta (AASHTO, 2011)

El procedimiento para la obtención de la visibilidad disponible por alzado es similar, limitando en este caso el cálculo a la sección vertical que contiene al eje de referencia. La altura de obstáculo y observador es representada a la escala vertical y los puntos de tangencia entre una visual recta y la línea de rasante, determinan el alcance de la visión correspondiente (Figura 14, Ministerio de Transporte de Colombia, 2008 y Figura 15, AASHTO, 2011)

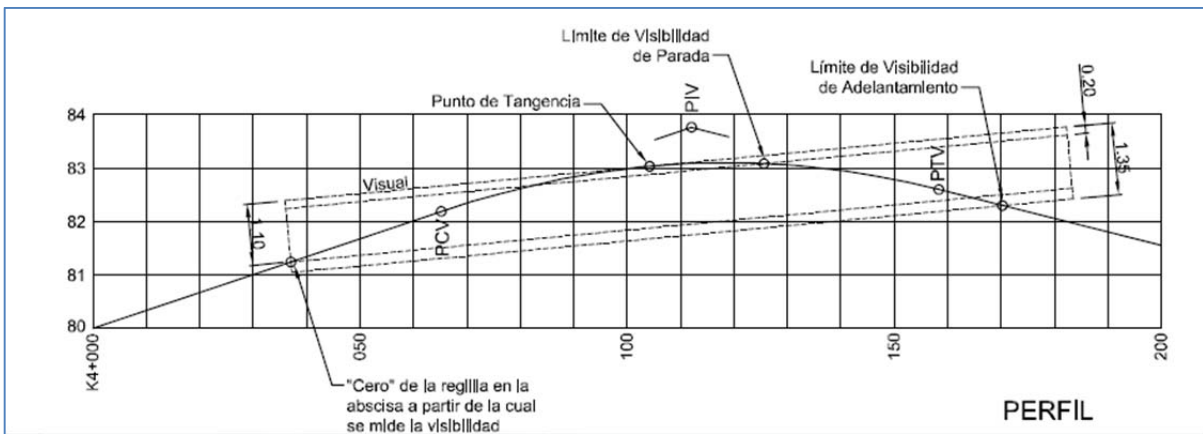


Figura 14. Obtención de visibilidad de parada y adelantamiento a partir de un plano de perfil longitudinal (Ministerio de Transporte de Colombia, 2008)

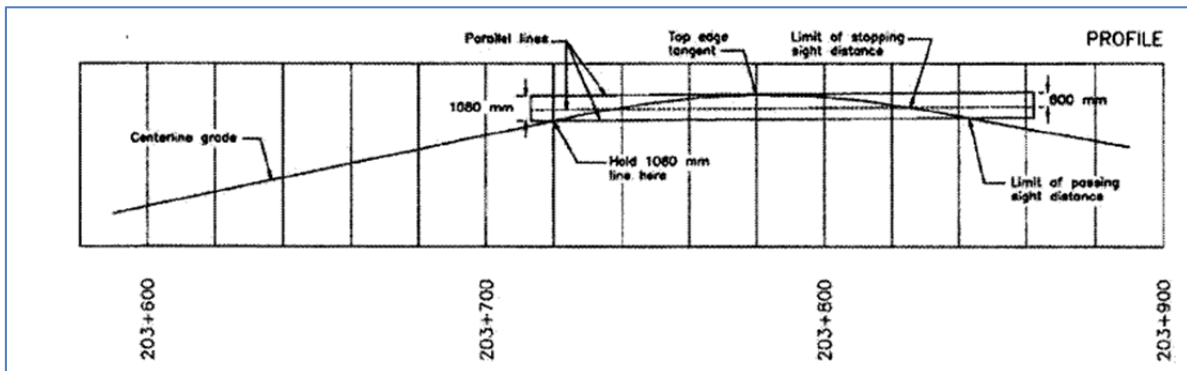


Figura 15. Obtención de visibilidad de parada y adelantamiento a partir de un plano de perfil longitudinal (AASHTO, 2011)

Otro ejemplo de este tratamiento bidimensional del problema lo constituye el análisis funcional de la visibilidad disponible en acuerdos convexos establecido en el Fambro (1997), donde se obtienen perfiles de visibilidad tales como los mostrados en la Figura 16. En ellos, no se tiene en cuenta el carácter tridimensional de la vía, y se indica que el punto más alto del acuerdo, es el de mayor visibilidad, lo que resulta únicamente cierto si el solape del acuerdo es con una alineación recta en planta.

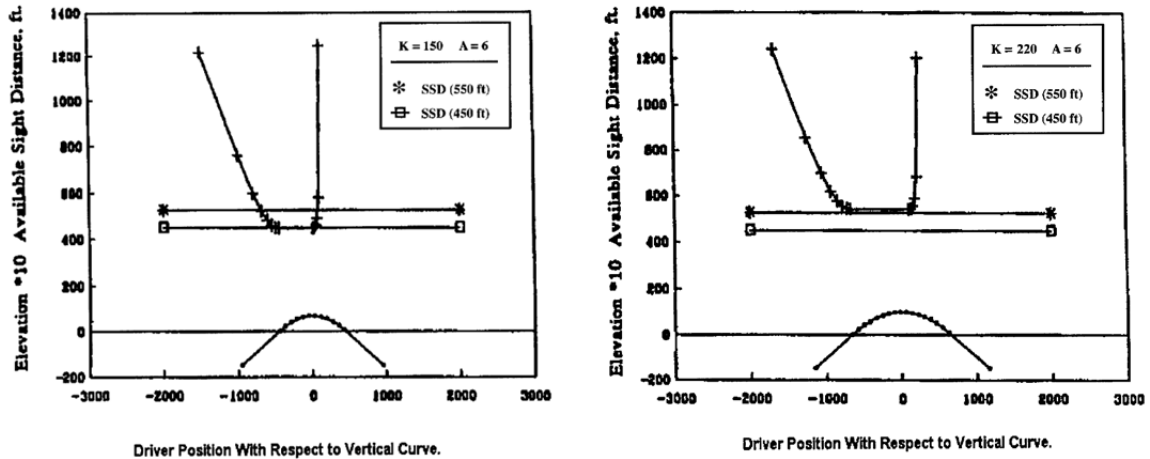


Figura 16. Perfil de visibilidad en acuerdos convexos (Fambro, 1997)

Rocci (Libro Blanco de Velocidad, Visibilidad y Adelantamientos, 1993), en un análisis asimismo bidimensional, estudió la distancia mínima de visibilidad de un acuerdo vertical y puso de manifiesto los diferentes resultados arrojados por acuerdos verticales largos y cortos. En caso de un acuerdo largo, definido como aquel cuyo ángulo girado cumpliera la condición expuesta en la Ecuación 11.

$$\theta^2 \geq 20.000 \cdot \frac{(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})}{|K_v|} \quad (11)$$

Donde:

θ es la diferencia algebraica de pendientes

h_1 la altura del observador (m)

h_2 la altura del objeto (m) y

K_v el parámetro del acuerdo (m)

la distancia de visibilidad mínima D_v es resulta de la Ecuación 12.

$$D_v = (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \cdot \sqrt{2 \cdot |k_v|} \quad (12)$$

Sin embargo, en caso de un acuerdo corto (aquél que no cumpla la condición impuesta anterior), la ecuación de la distancia anterior se reformula según la expresión de la Ecuación 13.

$$D_{v \min} = -\frac{120}{\theta} \cdot \frac{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1}} - \frac{k_v \cdot \frac{\theta}{200}}{\frac{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1}}} \quad (13)$$

En otras investigaciones se describe también una metodología bidimensional para el cálculo de la distancia de visibilidad disponible, para ello, Taiganidis (1998) realizó una investigación basada en las relaciones geométricas en la que se tomaba el punto de tangencia de la visual como referencia en un método iterativo. Así, para un acuerdo convexo, la distancia mínima de visibilidad se correspondía con la expresión correspondiente a la Ecuación 14.

$$D_p = \frac{1}{2} \cdot \left(L + \frac{200 \cdot k_v \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{L} \right) \quad (14)$$

Donde:

D_p es la distancia disponible (m)

L es la longitud del acuerdo (m)

K_v el parámetro del acuerdo (m) y

h_1, h_2 , las alturas del observador y del objeto respectivamente (m)

A pesar de las limitaciones de la bidimensionalidad del análisis y de que este método únicamente tenía en cuenta el obstáculo producido por la propia curva vertical, el perfil de visibilidad obtenido para un acuerdo convexo, arrojaba interesantes conclusiones sobre el efecto de la geometría del acuerdo sobre la visibilidad, observándose que la visibilidad disponible decrece de manera lineal hasta que llega al mínimo global, para luego aumentar hasta una asíntota vertical (Figura 17).

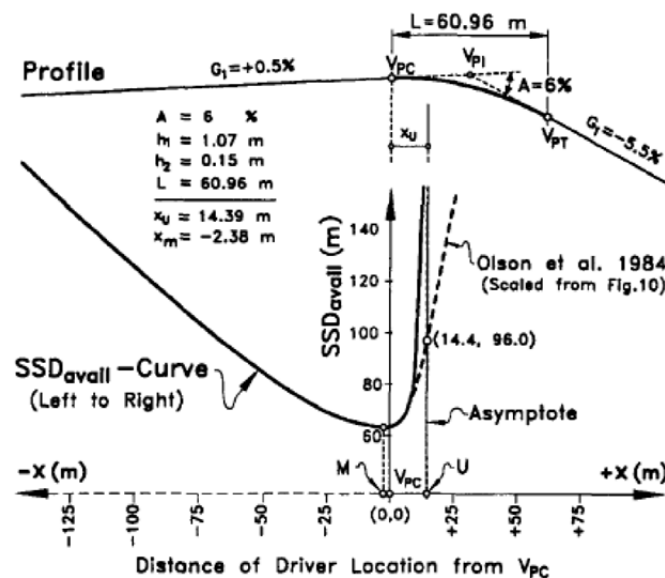


Figura 17. Perfil de visibilidad (Taiganidis, 1998)

Por su parte, Nehate et al. (2006), presentaron un estudio que evalúa la visibilidad de parada en carreteras existentes, para lo cual la carretera era restituida por medio de las coordenadas obtenidas con GPS, y su geometría calculada a partir de los nodos con B-splines cúbicos, resultando una curva paramétrica a trozos con uniones entre ellos de segundo grado de continuidad. El análisis de la distancia de visibilidad era, sin embargo, y a pesar del preconizado avance tridimensional del método, en dos dimensiones, tal y como pusieron de manifiesto García et al. (2007) en su Discusión sobre este artículo. La visibilidad correspondiente al alzado se calcula trazando la visual desde el observador que resulta tangente al acuerdo mediante un proceso iterativo hasta que se obtiene la diferencia de cota entre la visual y el trazado igual a la altura del objeto considerada (Figura 18).

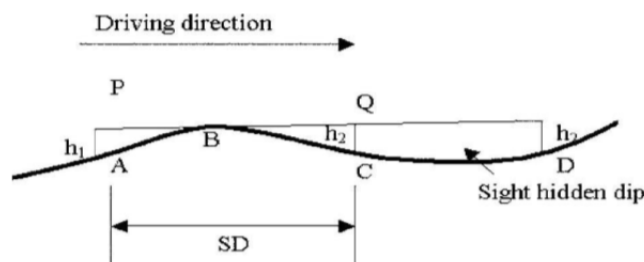


Figura 18. Esquema del cálculo de la visibilidad del alzado (Nehate, 2006)

El procedimiento descrito por Nehate et al. (2006) para el análisis de la visibilidad en planta es similar. Una vez posicionado el observador, se lanzan visuales a los distintos puntos del trazado de tal manera que una de estas visuales sea tangente a la línea marcada por el obstáculo lateral (talud, muro, árbol...). Posteriormente se obtiene el punto de la vía que está en esta visual, siendo la distancia de visibilidad la recorrida por la vía entre dicho punto y el observador. En caso de no encontrar la tangente al obstáculo en una distancia de 400 m, se toma como distancia de visibilidad por planta igual a 400 m (Figura 19).

Finalmente, la distancia de visibilidad final desde un observador será la mínima de entre las obtenidas en cada uno de los análisis realizados independientemente en planta y alzado.

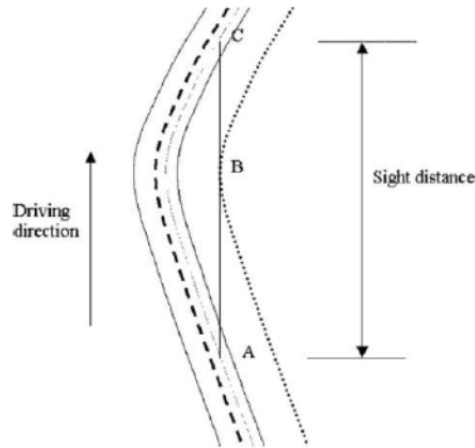


Figura 19. Esquema del cálculo de la visibilidad de la planta (Nehate, 2006)

2.2.2 Modelos tridimensionales

La complejidad de diseñar directamente en tres dimensiones, se traslada también a la evaluación de la visibilidad, no obstante, se han desarrollado diferentes métodos y modelos de cálculo para abordar el problema desde una perspectiva enteramente tridimensional. Estos modelos pueden ser de elementos finitos, analíticos, de simulación o basados en herramientas de diseño asistido por ordenador y software específico implementado en herramientas de diseño de obras lineales.

2.2.2.1 Modelos de elementos finitos

Con el fin de reflejar la naturaleza tridimensional del trazado, Hassan et al. (1996) propuso un modelo de elementos finitos para la determinación de la visibilidad en acuerdos verticales solapados con curvas horizontales. El modelo de elementos finitos dispone de flexibilidad para idealizar la superficie de la carretera y las obstrucciones a la visibilidad en una red de elementos finitos. En el modelo de Hassan, se introdujeron cuatro tipos de elementos para representar la vía, según el número de nodos de que disponía (Figura 20):

- Modelo rectangular de cuatro nodos. Posee un nodo en cada una de los vértices de una cuadrícula rectangular. La interpolación para hallar puntos intermedios se realiza linealmente.
- Modelo rectangular de seis nodos. Este elemento presenta dos nodos adicionales entre los vértices del rectángulo, pudiendo realizar interpolaciones cuadráticas o lineales. Así, una de las dimensiones posee una interpolación lineal y la otra, cuadrática.

- Modelo rectangular de ocho nodos. Añade al elemento anterior otros dos nodos adicionales, siendo posible la interpolación cuadrática en los dos sentidos.
- Modelo triangular de tres nodos. El elemento se consigue intersectando tres rectas en el espacio. No presenta ninguna diferencia en cuanto a eficiencia y precisión respecto del de cuatro nodos puesto que representa una superficie plana.

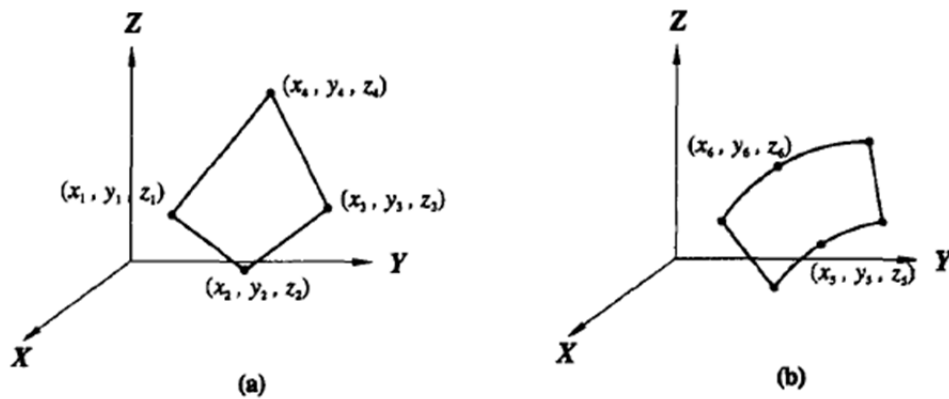


Figura 20. Ejemplo de elementos finitos de cuatro nodos (a) y seis nodos (b) (Hassan, 1996)

Dado que el elemento de cuatro nodos tiene solo dos nodos por filo, la interpolación a lo largo de cualquiera de los cuatro bordes será lineal. Por lo tanto, este elemento solo puede modelar segmentos con bordes rectos, que es el caso de los segmentos sin curvatura vertical u horizontal y con secciones transversales no curvas. Sin embargo, debido a la interpolación en dos direcciones, la superficie puede ser deformada en lugar de plana. Esto es particularmente útil en el modelado de los segmentos rectos con cambios de pendiente transversal.

El elemento de seis nodos, por otra parte, tiene tres nodos por cada uno de los dos bordes paralelos y dos nodos por cada uno de los restantes bordes. Desde cualquiera de los tres puntos se puede definir una parábola única (polinomio de segundo grado), la interpolación a lo largo de los bordes de tres nodos puede modelar curvas parabólicas exactamente. Sin embargo, la interpolación a lo largo de los otros dos bordes es todavía lineal. Por lo tanto, el elemento puede modelar segmentos con curvaturas vertical y/o horizontal y con secciones transversales no curvas. Además, dado que las curvas verticales están diseñadas y construidas como parábolas, los segmentos con solo curvatura vertical, se pueden modelar con exactitud utilizando el elemento de seis nodos. Sin embargo, este no es el caso para la curvatura horizontal, ya sea circular o espiral (clotoide). Por lo tanto, la curvatura horizontal debería ser modelada de forma simplificada por una serie de elementos pequeños.

Los dos elementos incorporados en el software de modelado proporcionaban valores exactos para los segmentos de rectas y curvas verticales, y proporcionaban un modelado aproximado para curvas horizontales (Figura 21). Sin embargo, el uso de elementos relativamente pequeños en las curvas horizontales produce una precisión satisfactoria. (Hassan et al., 1996)

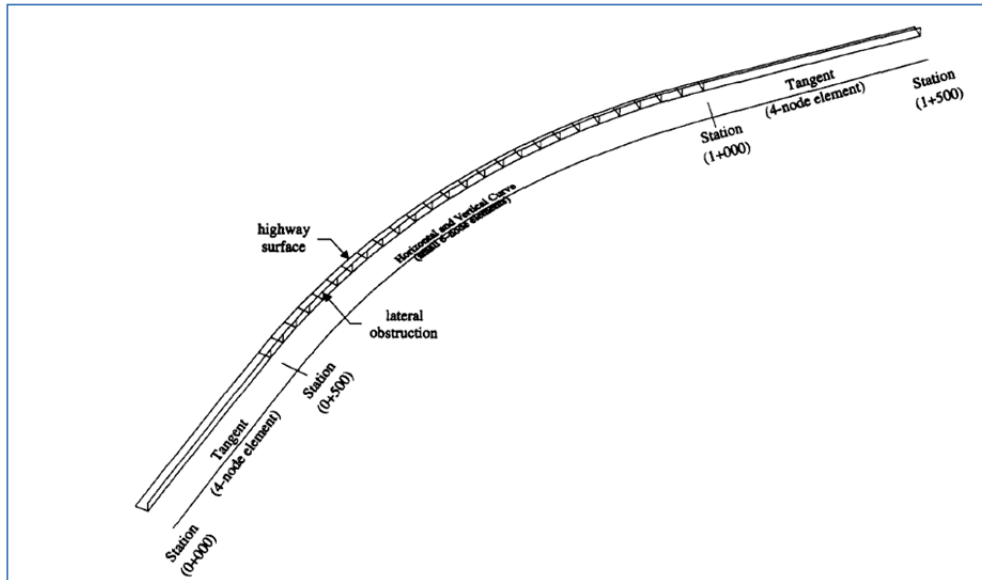


Figura 21. Ejemplo de modelado de una carretera con elementos finitos (Hassan, 1996)

El modelo de Hassan calcula la distancia de visibilidad mediante un proceso iterativo en el que se comprueba si la visual lanzada desde un observador a un objeto intercepta alguno de los elementos en la red, de manera que el proceso se detiene cuando, al avanzar el objeto una determinada distancia, una visual es obstruida por algún elemento plano. Así, con las limitaciones de la modelización, la precisión del modelo la define el usuario al decidir el avance del objeto.

En este modelo, los puntos intermedios se pueden calcular interpolando entre los conocidos. Si la distancia entre las secciones es pequeña, la precisión del modelo será mayor y no es necesario que se recurra a elementos de ocho nodos.

En el análisis realizado se demostraba que la obtención bidimensional de la distancia de visibilidad podía infraestimar o sobreestimar la visibilidad real tridimensional disponible.

García y Romero, (2007) presentaron una discusión sobre el artículo de Nehate (2006) que proponía una sistemática de obtención de visibilidades en la combinación tridimensional de alineaciones horizontales y verticales a partir de datos GPS obtenidos de

carreteras existentes. García y Romero mostraron que esta sistemática podía ser corregida incorporando los datos de la sección transversal. Para la comprobación de la visibilidad, dados el observador y el objeto, se calcula la visual que los une y se interseca la proyección en el plano horizontal con la sección transversal vertical. En ese punto se compara la cota de la visual con la del terreno, siendo visible el objeto si la cota de la visual está por encima de la del terreno (Figura 22)

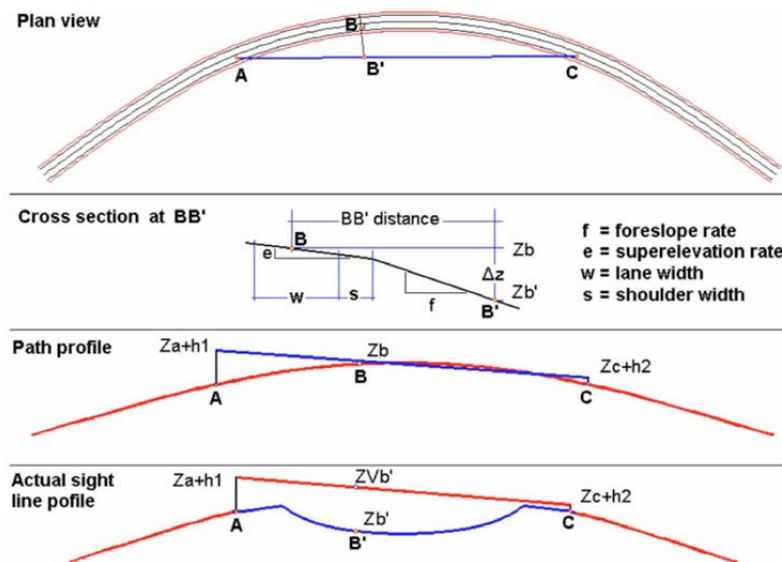


Figura 22. Obtención del perfil de la visual teniendo en cuenta la sección transversal (García et al. 2007)

Todas estas evaluaciones de la visibilidad son estáticas y son válidas mientras que las obstrucciones sean fijas. En el caso de que existan obstáculos móviles, es necesario evaluar esta distancia de visibilidad dinámicamente. Este es el caso de la distancia de adelantamiento, donde el vehículo a sobrepasar supone un obstáculo móvil a la visual. El problema dinámico es mucho más complejo que el análisis convencional estático de la distancia de visibilidad ya que no se puede ignorar la naturaleza tridimensional de la vía, es necesario comprobar continuamente la distancia de adelantamiento en todo el desarrollo de la vía, además, el comportamiento de los conductores no es único pudiendo existir interacciones entre los obstáculos móviles y fijos.

Yan et al. (2008) abordaron este reto con la evaluación de la distancia dinámica de adelantamiento mediante un modelo de elementos finitos. Los vehículos que suponen un obstáculo se han modelizado como elementos rectangulares, de manera que pueden ser introducidos en la red de elementos finitos.

En esta investigación, la distancia de adelantamiento se calculó, por una parte, estáticamente atendiendo solo a obstáculos fijos, y luego de forma dinámica comprobando también los obstáculos móviles. Sin embargo, cuando el vehículo que obstaculiza la visión se considera como un elemento dinámico, solo comprobar la distancia dinámica puede sobreestimar el riesgo potencial de adelantamiento tomado por el conductor. Por ello, se define el ámbito de obstrucción a la visual (*sight obstruction scope*) tal y como se muestra en la Figura 23.

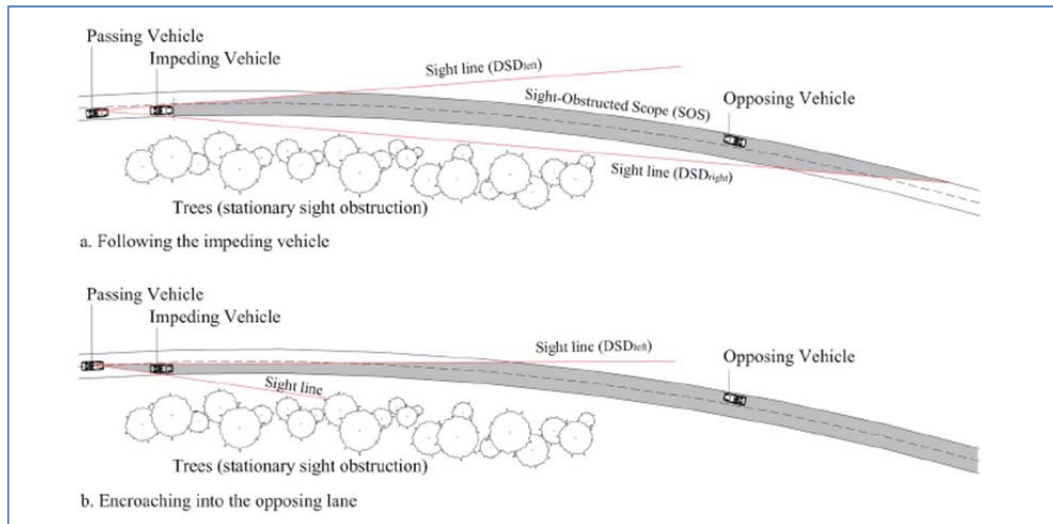


Figura 23. Definición del problema dinámico de la distancia de visibilidad de adelantamiento (Yan et al. 2008)

Los elementos finitos utilizados en el modelo de Yan et al. (2008), están basados en los utilizados por Hassan et al (1996), y son los siguientes (Figura 24):

- Modelo rectangular de cuatro nodos. Posee un nodo en cada una de los vértices de una cuadrícula rectangular. La interpolación para hallar puntos intermedios se realiza linealmente.
- Modelo rectangular de seis nodos. Este elemento presenta dos nodos adicionales entre los vértices del rectángulo, pudiendo realizar interpolaciones cuadráticas o lineales. Así, una de las dimensiones posee una interpolación lineal y la otra, cuadrática.
- Modelo rectangular de ocho nodos. Añade al elemento anterior otros dos nodos adicionales, siendo posible la interpolación cuadrática en los dos sentidos.

- Modelo triangular de tres nodos. El elemento se consigue intersectando tres rectas en el espacio. No presenta ninguna diferencia en cuanto a eficiencia y precisión respecto del de cuatro nodos puesto que representa una superficie plana.

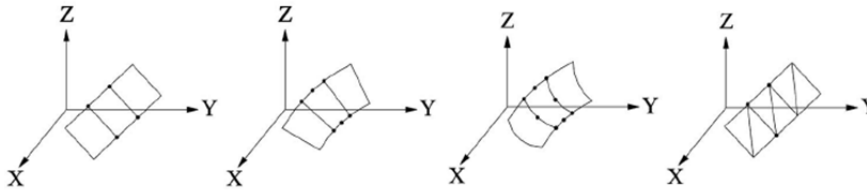


Figura 24. Modelos de elementos finitos utilizados en la evaluación de la distancia de visibilidad de adelantamiento (Yan et al. 2008)

2.2.2.2 Modelos analíticos

Los modelos analíticos se basan en la representación paramétrica de la vía y los elementos de la sección transversal sin ninguna aproximación implícita de la superficie de la carretera. El modelo presentado por Ismail (2007) se diferencia de los anteriores en que la búsqueda de la distancia de visibilidad se realiza en la superficie verdadera de la carretera y sus alrededores en vez de en una superficie idealizada. Al referir todas las características de la vía al eje de la calzada, es posible modelizar la mayoría de las geometrías en alzado y planta.

Este modelo, parametriza todas las secciones transversales respecto del eje de la calzada. La obstrucción se solventa como un problema de optimización, en el que se minimiza la diferencia de cotas entre la altura de la visual y la de la sección parametrizada. De esta manera es posible introducir obstrucciones si se refieren al eje, resolviendo por ejemplo, el caso de la existencia de una mediana en curva con una ecuación de segundo grado que representa la intersección de una recta y un círculo. El algoritmo representa la pendiente transversal de los taludes y terraplenes como una proyección de un cono y con relaciones de ángulos, obtiene si la visual ha intersectado el talud. Este programa ubica secciones cada 2 m, pero cerca del punto de obstrucción, se aumentan el número de secciones calculadas de forma que el espaciamiento entre ellas es de tan solo 10 cm. Esta forma de proceder constituye un modelo alternativo al uso de elementos finitos tal y como puede observarse en la Figura 25.

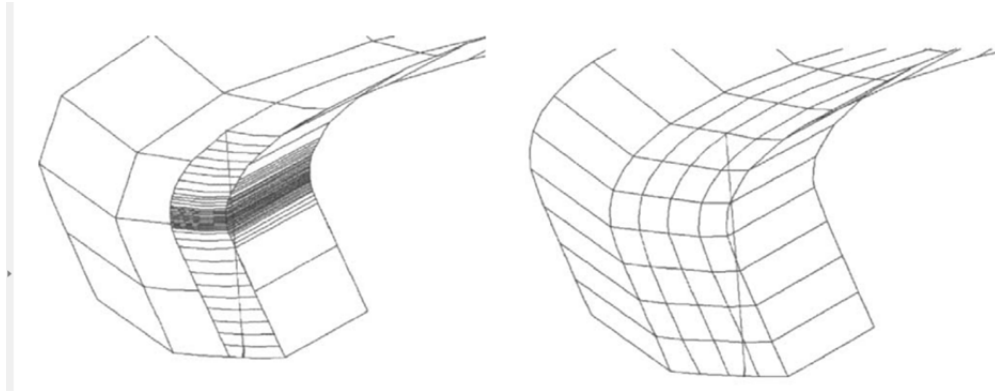


Figura 25. Modelización de la geometría de la carretera con el modelo analítico de Ismail, 2007, (izquierda) y con el de elementos finitos (derecha)

El programa de Ismail no incluye curvas de transición en planta, pero sí rectas y curvas horizontales, así como acuerdos verticales. Con el fin de validar el algoritmo, se analizó una curva de amplio radio y se compararon los resultados con los que se obtenían para una curva vertical analizada en dos dimensiones, obteniéndose una diferencia de únicamente el 0,4%. Análogamente, se realizó la comparación con un parámetro de acuerdo nulo y la diferencia es del 0,05%, resultando válido el modelo si éste se compara con los procedimientos bidimensionales tradicionales. En dicha comparación, el perfil de visibilidad tridimensional arrojaba distancias de visibilidad mayores que el análisis tradicional 2D de una curva vertical, pero menores que en el análisis bidimensional de una curva horizontal plana (Figura 26).

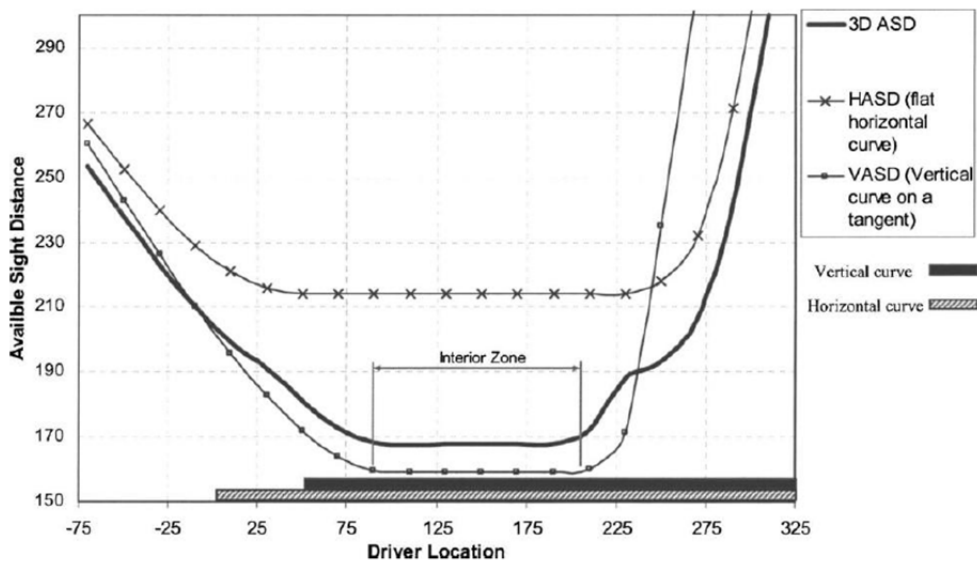


Figura 26. Perfil de visibilidad 2D y 3D (Ismail, 2007)

La modelización analítica forma asimismo parte de los fundamentos de cálculo de las distancias de visibilidad disponibles, implementados en algunos de los programas de diseño geométrico de carreteras tales como CLIP (TOOL S.A.).

En este caso, las secciones transversales complementan el modelo tridimensional de la carretera referido a la posición en planta y alzado de un eje de referencia. A partir de dicho eje, la plataforma proyectada está definida por puntos ubicados a una cierta distancia y con un incremento de cota positivo o negativo con respecto a él unidos por líneas rectas.

El terreno se obtiene de levantamientos topográficos o de lecturas de modelos digitales del terreno, constituyendo la intersección de la superficie del terreno definida por dicho modelo con un plano vertical y perpendicular al eje en cada punto kilométrico decidido por el usuario o establecido a intervalos constantes.

El cálculo de la distancia de visibilidad disponible se realiza mediante la comprobación, perfil a perfil, de que la visual se encuentra por encima de la cota correspondiente al terreno y a la plataforma y sus taludes de excavación y relleno asociados (Figura 27).

Dado que se trata de programas específicos de diseño, estos programas permiten incluir obstáculos adicionales de forma manual definidos por puntos kilométricos de inicio y fin y distancias al eje lo que permite modelizar, con ciertas limitaciones, elementos lineales tales como barreras de protección o muretes de contención.

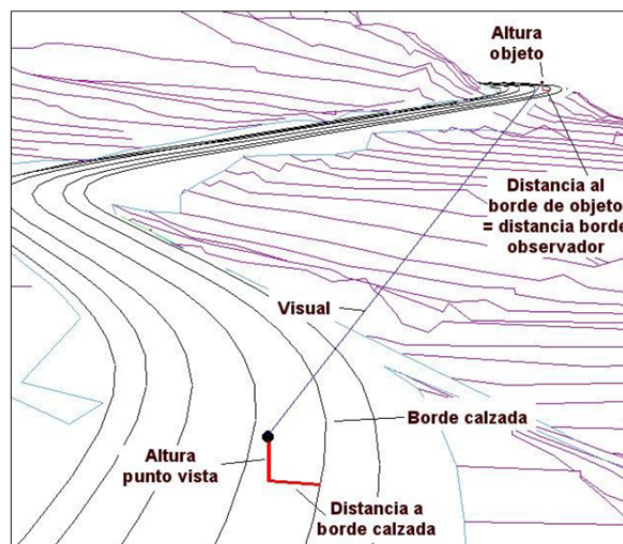


Figura 27. Esquema gráfico de obtención de visibilidades mediante el programa de diseño de carreteras CLIP (TOOL S.A.)

2.3 LA TECNOLOGÍA LIDAR

LiDAR es el acrónimo en inglés de Light Detection And Ranging y se emplea para identificar a la tecnología capaz de medir la distancia desde un emisor hasta una superficie utilizando un haz de luz láser pulsado.

El rápido desarrollo de las capacidades de equipos de medida basados en esta tecnología proporciona nuevas posibilidades a la ingeniería de carreteras que es necesario explorar. Una parte de ellas queda constituida por la evaluación de visibilidades realmente disponibles, lo que constituye el objeto de la presente investigación.

Para analizar este potencial de uso es necesario, no obstante, conocer con mayor profundidad tanto los fundamentos de la tecnología LiDAR, como el funcionamiento de los equipos que la utilizan, de manera que sea posible entender no solo sus posibilidades, sino también sus limitaciones.

2.3.1 Fundamentos de la tecnología LiDAR

2.3.1.1 El espectro electromagnético

El espectro electromagnético está presente en un gran número de situaciones cotidianas, calentar la comida en un horno microondas, o llamar con un teléfono móvil por ejemplo, pone en juego ciertas características de parte del espectro electromagnético. La razón por la que se ven los objetos es porque emiten, reflejan o transmiten una proporción de la parte visible del espectro electromagnético que conocemos como luz. La parte visible del espectro electromagnético está compuesta por los colores que se pueden ver en el arcoíris, desde los rojos y naranjas, hasta los azules y violetas.

Cada uno de los diferentes colores se corresponde con diferentes longitudes de onda. Si se hace pasar luz blanca a través de un prisma de vidrio, se puede apreciar por ejemplo, que la luz violeta es desviada o refractada más que la luz roja debido a que tiene una longitud de onda menor. De la misma manera se hacen visibles el resto de colores y se puede simular el efecto arcoíris (Figura 28).

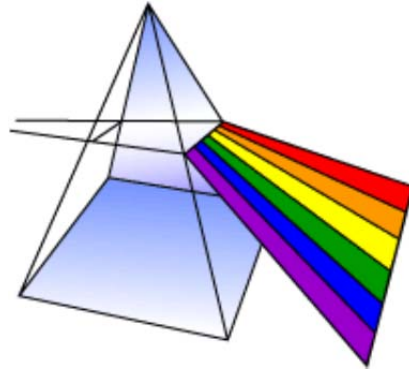


Figura 28: Prisma que convierte la luz blanca en los diferentes colores (fuente: Lerma et al., 2008)

De igual manera, las demás ondas del espectro electromagnético tienen también diferentes longitudes de onda, desde las ondas largas de radio, hasta los cortos rayos gamma (Figura 29).

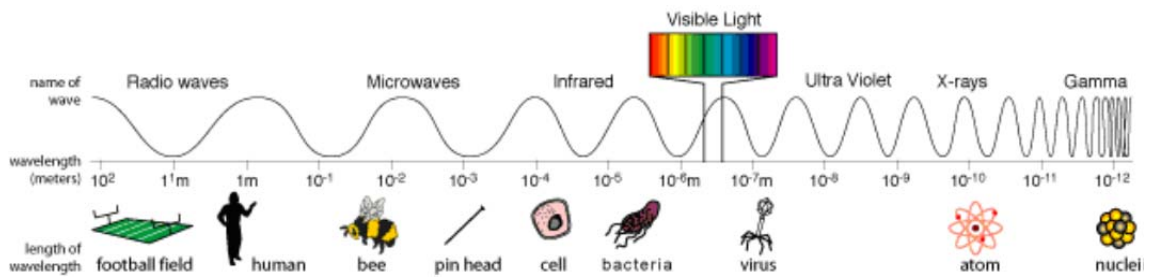


Figura 29: El espectro electromagnético (fuente: Lerma et al., 2008)

El espectro electromagnético se puede expresar en términos de su energía, de su longitud de onda o de su frecuencia. Todas estas magnitudes están relacionadas mediante las relaciones expresadas en las Ecuaciones 15 y 16 (Lerma et. al., 2008):

$$c = f \cdot \lambda \quad (15)$$

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (16)$$

- Siendo:
- c velocidad de la luz: 299.792.458 m/s
 - E energía radiante (J)
 - f frecuencia de la onda (Hz)
 - λ longitud de onda (m)

h Constante de Planck: $6,626069 \times 10^{-4}$

Por lo tanto, las ondas electromagnéticas de altas frecuencias tienen longitudes de onda corta y energía alta, y viceversa, las ondas de bajas frecuencias tienen longitudes de onda largas y energía baja.

2.3.1.2 El láser

La palabra LASER es el acrónimo en inglés de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. (Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) y se utiliza para designar a aquel dispositivo o instrumento que es capaz de generar ondas de luz haciendo uso de una banda estrecha del espectro. Un láser emite luz en un estrecho y poco divergente haz de longitud de onda bien definida, correspondiente a un color en particular, si el láser es operativo en el espectro visible. Esto contrasta la luz emitida por ejemplo por una bombilla incandescente, ya que ésta tiene un amplio espectro de longitudes de onda, lo que provoca que la luz se aprecie de color blanco y aparezca transmitida en todas direcciones y no lo haga en una sola.

2.3.1.3 Propiedades importantes de la luz láser

La luz láser tiene algunas propiedades muy especiales que la distinguen de la luz proveniente de otras fuentes y que la hacen especialmente útil para ciertas aplicaciones:

- La luz láser se genera en forma de haz láser. Este haz tiene un alto grado de coherencia espacial, propagándose en una dirección bien definida con un haz moderadamente divergente. El término coherencia hace referencia a que la señal eléctrica guarda una relación de fase constante en diferentes puntos a lo largo del haz. Esta coherencia es la razón por la que un haz láser se puede propagar a lo largo de amplias distancias y se focaliza produciendo manchas de luz muy pequeñas.
- La luz láser también tiene un alto grado de coherencia temporal, lo que equivale a una longitud de coherencia larga. Longitudes de coherencia largas implican una rígida relación de fase a través de intervalos de tiempo relativamente largos, correspondientes a largas distancias de propagación (a menudo algunos kilómetros).
- Los haces de láser visible tienen un cierto color puro, por ejemplo rojo, verde o azul, pero no blanco o magenta. Por ejemplo, la mayoría de los láseres usados en mediciones cortas y medias tienen una longitud de onda de 1064 nm (infrarrojo cercano) o 532 nm (láser verde). Es destacable que una longitud de coherencia larga introduce una tendencia al fenómeno del ruido del láser, es decir, que se puede observar un patrón granular característico. Este efecto se

puede observar por ejemplo, cuando un haz láser incide en una superficie metálica.

- En la mayoría de casos, la luz láser está polarizada linealmente. Esto significa que el campo eléctrico oscila en una dirección espacial particular.

Además de las anteriores, la luz láser puede tener también otras propiedades destacables en función de la aplicación:

- La luz láser puede ser visible, pero la mayoría de láseres emiten en otras regiones del espectro que el ojo humano no puede percibir.
- La luz láser no siempre es continua y puede ser emitida en forma de pulsos cortos o ultra cortos. Como consecuencia de esto, los máximos de potencia pueden ser extremadamente altos.

Los haces de láser permanecen enfocados cuando se proyectan sobre un escenario lejano gracias a las propiedades de coherencia. Otra propiedad fundamental de las ondas de luz láser es su velocidad de propagación, la luz viaja con una velocidad finita y constante en un determinado medio. Como consecuencia de estas propiedades, la luz láser es muy adecuada para la medición de objetos. (Lerma, et. al., 2008)

2.3.1.4 Mediciones usando la luz

Debido a los recientes desarrollos en la visión por computador y la tecnología de sensores, la luz se ha utilizado de varias maneras para medir distancias a objetos. Estas técnicas de medición se pueden dividir en dos categorías: técnicas activas y pasivas.

Las técnicas pasivas no emiten radiación alguna sino que se basan en detectar la radiación ambiental reflejada. La mayoría de escáneres de este tipo detectan la luz visible porque es una radiación ambiental fácilmente disponible. Otros tipos de radiación, como el infrarrojo, también pueden ser usados. Los métodos pasivos pueden ser muy baratos porque en la mayoría de los casos no necesitan más hardware que una cámara digital. El problema con estas técnicas es que dependen de encontrar correspondencias entre imágenes bidimensionales, lo que no siempre tiene una única solución. La precisión de estos métodos depende mayoritariamente de la resolución de las imágenes y de la densidad de elementos identificables en ellas.

Los escáneres activos sin embargo, emiten algún tipo de radiación controlada y detectan su reflexión con el fin de sondear un objeto o un entorno. Los posibles tipos de radiación utilizados incluyen la luz, los ultrasonidos o los rayos X. Como estas técnicas de medición activa requieren un transmisor y un receptor, son mecánicamente más complejos que las técnicas pasivas, no obstante, presentan ciertas ventajas (Lerma, et. al., 2008):

- No requieren luz ambiental porque estos sistemas generan su propia radiación.
- Proporcionan gran cantidad de mediciones de manera automática.
- Se pueden utilizar en superficies sin rasgos distintivos.
- Pueden capturar mucha información en poco tiempo.

Sin embargo, algunos sistemas activos pueden verse afectados por fuentes de luz externas, reflectividad, color y rugosidad. Existe un gran número de escáneres activos, diferenciándose todos ellos en la manera en la que el escáner recibe y/o analiza la señal de radiación reflejada.

2.3.1.5 Medición basada en tiempo

Los escáneres de medición basados en tiempo son escáneres activos que miden un intervalo de tiempo entre dos sucesos. En general, hay dos principios de medición por tiempo: escáneres basados en pulsos (tiempo de vuelo) y basados en fase.

Escáneres basados en pulsos (Tiempo de vuelo):

En el caso de que la radiación empleada en la medición sea la luz láser, es sabido que sus ondas viajan con una velocidad finita y constante a través de un medio. Por consiguiente, cuando puede medirse el tiempo transcurrido desde que la luz viaja de una fuente a un objeto reflectante y regresa a la fuente (Figura 30), la distancia a dicha superficie puede calcularse mediante la relación expresada en la Ecuación 17.

$$D = \frac{c \cdot t}{2} \quad (17)$$

Siendo:

- D distancia (m)
 c velocidad de la luz en el aire (299.792.458 m/s)
 t tiempo que tarda la señal en ir y volver (s)

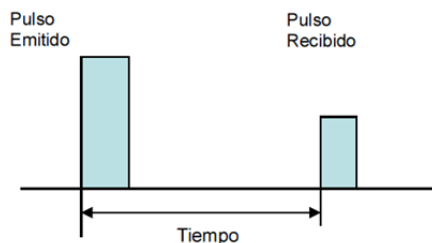


Figura 30: Medición láser por pulsos (fuente: Lerma et al., 2008)

La Figura 31 muestra el principio de un láser escáner basado en tiempo de vuelo:

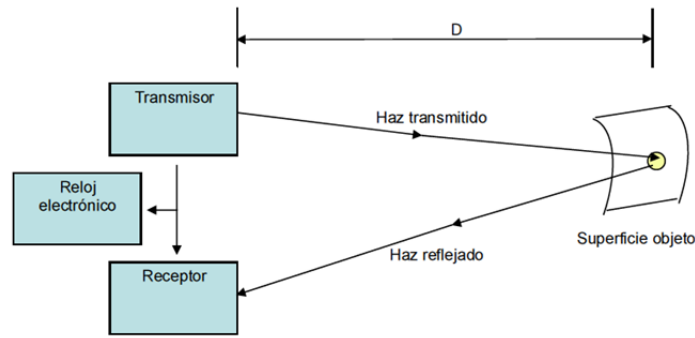


Figura 31: Principio de un láser escáner basado en tiempo de vuelo (fuente: Lerma et al., 2008)

El valor actual de la velocidad de la luz en el vacío es exactamente 299.792.458 m/s. Si la luz viaja por el aire, se debe aplicar un factor de corrección igual al índice de refracción (que depende de la temperatura del aire, de la presión y de la humedad). De forma simplificada, tomando el valor de la velocidad de la luz en el aire como $3 \cdot 10^8$ m/s aproximadamente, se puede obtener que a esa velocidad emplea 3,33 nanosegundos en recorrer un metro, por lo que para alcanzar una precisión de 1mm, es necesario ser capaz de medir intervalos de tiempo de alrededor de 3,33 picosegundos (Lerma, et. al., 2008).

Los escáneres por tiempo de vuelo no suelen usar haces continuos, sino pulsos de láser. Escanean todo su campo de visión punto a punto cambiando la dirección del haz mediante una unidad de desviación.

Hay que destacar que para que no se produzcan mediciones ambiguas, el tiempo medido (t) debe ser menor que la amplitud del pulso (T_{pulso}). De esta manera, se deben cumplir las condiciones expresadas en las Ecuaciones 18 y 19.

$$t < T_{pulso} \quad (18)$$

$$\text{ó} \quad d > \frac{1}{2} \cdot c \cdot T_{pulso} \quad (19)$$

siendo:

- c velocidad de la luz en el aire (299.792.458 m/s)
- t tiempo que tarda la señal en ir y volver (s)
- T_{pulso} tiempo transcurrido entre dos pulsos de luz consecutivos (s)
- d distancia (m)

De esta forma, si se toma el valor de T_{pulso} como 10 ps, la máxima precisión que se puede alcanzar es de $d = 1.5\text{mm}$. La mayoría de los sistemas comerciales de medio y

largo alcance proporcionan una precisión entre 6 y 10 mm. Como la precisión depende del mecanismo del reloj, el error de un escáner por tiempo de vuelo es casi independiente de la distancia.

Es importante destacar que el método derivado del tiempo para medir el retorno del pulso depende de la resolución temporal deseada, de la resolución del reloj y del rango dinámico requerido del pulso.

En un sistema de tiempo de vuelo, la máxima frecuencia de pulso está determinada por el hecho de que el emisor no puede enviar un pulso hasta que no haya recibido el anterior. La finalidad de esta restricción es evitar la confusión en la llegada de los pulsos, lo que recibe el nombre de máximo rango de certeza. Este parámetro depende de la duración del pulso y de su frecuencia, tal y como muestra la Figura 32.

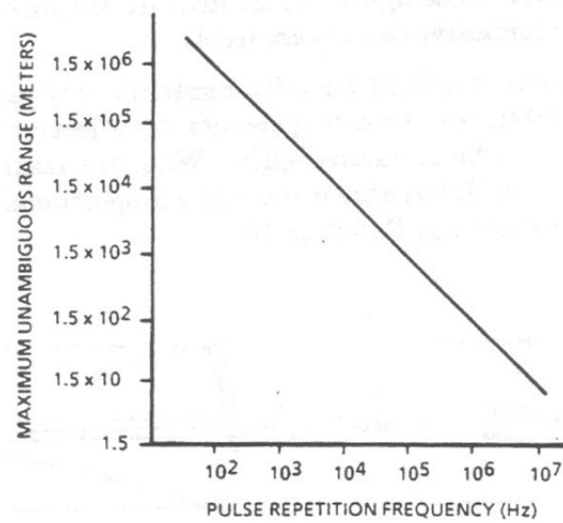


Figura 32: Máximo rango de certeza en función de la frecuencia de pulso (fuente: Lerma, et. al., 2008)

Hay tres factores principales que determinan la precisión de un sistema de medida por pulsos:

- La capacidad de seleccionar la misma posición relativa en el pulso emitido y recibido para medir el intervalo de tiempo. Esto está limitado por el ruido, la fluctuación, la fuerza de la señal, la sensibilidad del detector, y la brevedad y la capacidad de reproducción del emisor del pulso.
- La precisión con la que se fija un lapso de tiempo.
- La precisión del instrumental en la medida de los intervalos de tiempo.

La ventaja de usar un sistema de pulsos para las mediciones láser de distancia es la alta concentración de la energía transmitida. Esta energía hace posible que se alcance el ratio señal-ruido (SNR) necesario para altas precisiones en mediciones de larga distancia (hasta varios centenares de metros). El inconveniente es el problema de detectar la

llegada exacta de los retornos dispersos del pulso debido a la naturaleza cambiante de las tolerancias ópticas y la atenuación atmosférica.

Más de un eco puede ser medido debido a los múltiples retornos que son causados por las características del medio, en particular cuando la cubierta vegetal es escaneada. La mayoría de los sistemas aéreos son capaces de capturar 4 ó 5 ecos diferentes. Las mediciones de múltiples ecos también han llegado a ser posibles en los escáneres terrestres de tiempo de vuelo.

Escáneres basados en la fase:

Otro principio de medición basado en tiempo evita el uso de relojes de alta precisión modulando la potencia del haz láser. La luz emitida se modula en amplitud y se envía a una superficie. La reflexión dispersa se captura y un circuito mide la diferencia de fase entre las ondas enviada y recibida, y por tanto la demora (Figura 33).

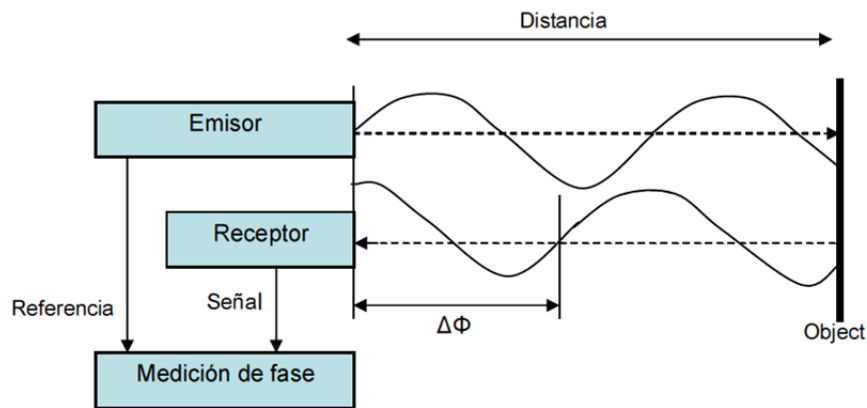


Figura 33: Principio de medición basado en la fase (fuente: Lerma et al., 2008)

Los escáneres típicos basados en la fase modulan su señal utilizando modulaciones sinusoidales, amplitud modulada (AM), frecuencia modulada (FM), pseudo ruido o modulación polarizada.

La diferencia de fase puede estar relacionada con el retardo similar al medido en los escáneres basados en pulsos. La relación entre el desfase ($\Delta\phi$), la frecuencia modulada (f_{modulada}) y el retardo (t) se expresa en la Ecuación 20.

$$t = \frac{\Delta\phi}{2\pi f_{\text{modulada}}} \quad (20)$$

Por tanto, según la ecuación de medición de distancia basada en el tiempo de vuelo, la distancia al objeto viene dada por la Ecuación 21.

$$D = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{c}{4\pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{f_{\text{modulada}}} \quad (21)$$

Si se toma el valor de la frecuencia de 10MHz y una resolución de fase de 0,01 grados, se puede obtener una resolución de en torno a 0,5 mm.

Al igual que ocurre con los sistemas basados en tiempo de vuelo, no debe producirse ambigüedad en la identificación del rebote de la onda, por lo que para estos sistemas, el alcance está limitado al que corresponde a un retardo de fase de un ciclo de la onda senoidal. En la Ecuación 22 se muestra la expresión del máximo alcance en el que se da esta condición para una onda continua.

$$Z_{amb} = \frac{c}{2 \cdot f_{modulada}} \quad (22)$$

En el ejemplo anterior, para una frecuencia de 10 MHz, el alcance máximo está sobre los 15 m. Para evitar el inconveniente de un intervalo de ambigüedad en la medición, se pueden utilizar varias frecuencias de manera que con las frecuencias más bajas (mayor longitud de onda) se localiza el punto a medir y con las altas frecuencias se mide la distancia con precisión.

En la última generación de escáneres basados en fase, se superponen 2 o incluso 3 longitudes de onda diferentes, tal y como muestra la Figura 34:

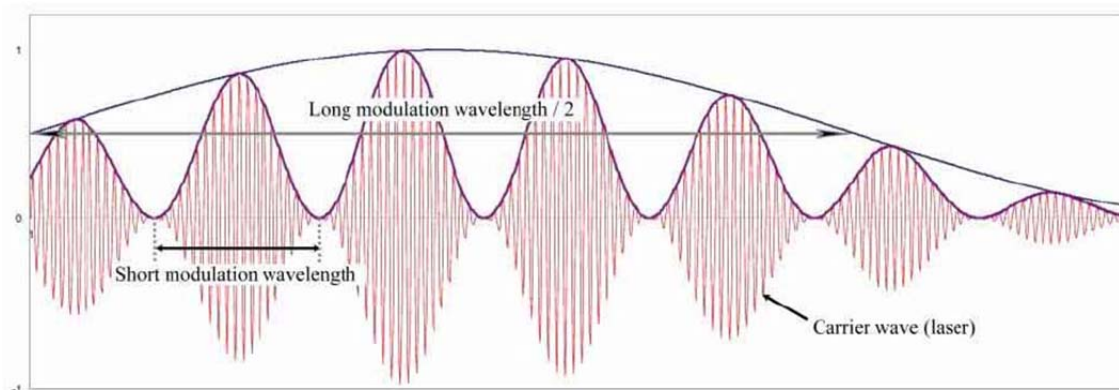


Figura 34: Esquema de dos modulaciones de onda y una onda portadora para la medición de distancia basada en fase (fuente: Pfeifer et al., 2007)

La longitud de onda larga define la distancia con unicidad y la longitud de onda corta define la precisión que puede obtenerse.

Este es el método más ampliamente utilizado en los instrumentos topográficos de medición y la precisión del resultado depende de la exactitud obtenida en la determinación de la diferencia de fase. Ésta es mucho más sencilla de obtener que el tiempo de vuelo, por lo que el principio usado en estos instrumentos permitiría obtener mayor exactitud en los resultados. Sin embargo para obtener una buena onda reflejada y poder comparar su fase con la onda emitida es necesario que la onda tenga una energía elevada, por lo que es necesaria la emisión de mucha energía y/o que el objeto a medir se

encuentre cerca. Los instrumentos de este tipo tienen en general menor alcance y mayor precisión. Generalmente, la precisión de un escáner basado en fase está limitada por (Lerma, et. al., 2008):

- Frecuencia de la señal o modulación.
- Precisión en el ciclo de medición de la fase.
- Potencia de la señal, el ruido...
- Estabilidad del oscilador de modulación.
- Turbulencias en el aire por el que se realiza la medición.
- Variaciones en el índice de refracción del aire.

2.3.2 Sistemas LiDAR aéreo y LiDAR mobile

Las posibilidades de medición de distancias mediante la tecnología LiDAR expuestas en apartados anteriores se ha potenciado notablemente con el desarrollo de sistemas que permiten el montaje de escáneres láser en plataformas móviles en combinación con sistemas de posicionamiento que permiten determinar las coordenadas x,y,z de los puntos obtenidos. De este modo, a diferencia de los sistemas estáticos, es posible llevar a cabo una labor de escaneado continuo, lo que incrementa de forma muy sustancial la extensión de terreno cubierta y por tanto los rendimientos del trabajo realizado.

Los sistemas así concebidos pueden ser aerotransportados, si la plataforma móvil es un avión o helicóptero (LiDAR aéreo), o montados sobre un vehículo automóvil (LiDAR mobile o Mobile mapping). En ambos casos, el posicionamiento de los puntos se consigue mediante la integración, junto con los escáneres láser, de un sistema de navegación por satélite GPS (sistema de posicionamiento global) o GNSS (sistema global de navegación por satélite) así como de una unidad de medición inercial (IMU). En el caso de los vehículos automóviles, el sistema se completa con al menos un odómetro instalado en uno de los neumáticos posteriores. Estos sistemas pueden asimismo complementarse con cámaras digitales para una toma simultánea de una o varias imágenes fotográficas (Figura 35)

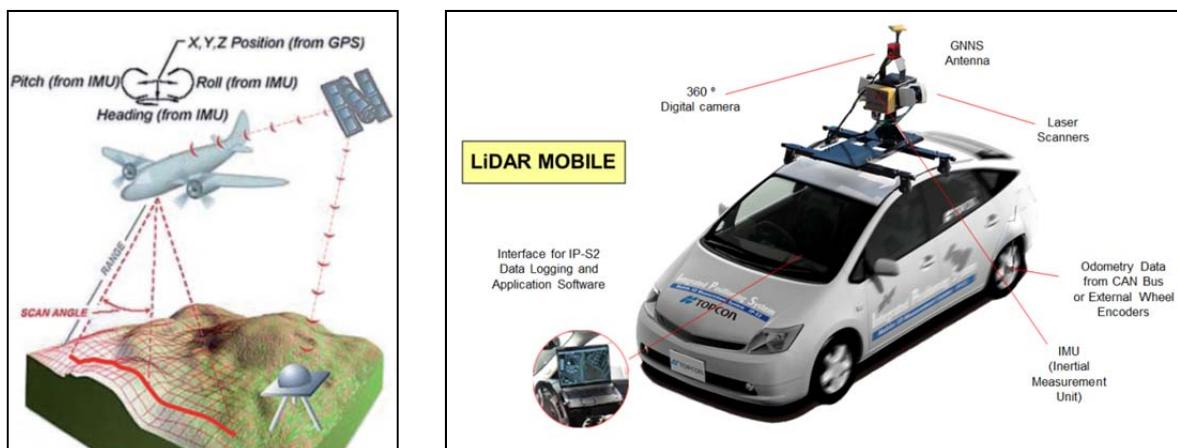


Figura 35: Sistemas de LiDAR aéreo (izquierda) y LiDAR mobile (derecha)

Debido a la rápida evolución en la potencia y características técnicas de los equipos tanto aerotransportados como montados sobre vehículo automóvil propia de un sector tecnológico en pleno crecimiento, no se ha considerado oportuno llevar a cabo una recopilación y descripción de los diferentes equipos y marcas comerciales disponibles, ya que ésta es una información que queda rápidamente obsoleta en la época actual. No obstante, una revisión de los sistemas Lidar disponibles en fechas 2009 y 2010 se encuentra en Lemmens, 2007 (Lidar aéreo) y Petrie, 2010 (Lidar mobile).

2.3.2.1 Sistemas LiDAR aéreo

A principio de los años 70 del siglo XX, se demostró que los sistemas Lidar montados en un avión eran capaces de medir distancias entre el avión y objetivos situados sobre el terreno con un error de menos de 1 metro. Sin embargo, los sistemas de altimetría láser no se extendieron debido fundamentalmente a dos motivos: en primer lugar, para una topografía precisa, la posición vertical del avión tiene que ser conocida con un nivel de precisión similar al sistema Lidar y en segundo lugar, la posición horizontal del foco iluminado situado en el terreno, tiene que ser también conocida. Estas dos circunstancias inhabilitaban en ese momento esta técnica para grandes extensiones de terreno (Vosselman et al., 2010).

A finales de los años 80 de ese mismo siglo, con la disponibilidad del GPS, se desarrolló un método que permitía el registro preciso de posición y orientación en grandes áreas. Con la introducción de un GPS diferencial (DGPS) la posición del escáner puede ser conocida en coordenadas horizontal y vertical en rango sub-decimétrico (Krabill, 1989; Friess, 1989).

Más tarde, a principios de los años 90, los primeros perfiladores láser son sustituidos por dispositivos de escaneo que generaban de 5.000 a 10.000 pulsos por segundo. Hoy en día, la frecuencia de pulsos laser alcanza valores de 300 KHz o superiores.

Debido a que el funcionamiento de estos sistemas es relativamente independiente de la existencia de luz ambiente y a su alto rendimiento, el Lidar aéreo es una técnica común para generar presentaciones 3D del terreno de alta calidad (modelos digitales del terreno) con ciertas ventajas sobre otros sistemas topográficos, existiendo una amplia oferta de empresas que emplean variados sistemas aéreos de forma comercial.

Los componentes básicos de un sistema Lidar aéreo son los siguientes (Figura 36):

- **Escáner:** comprende el láser y los dispositivos ópticos y es montado normalmente en un hueco en el fuselaje de la aeronave. Envía pulsos de manera continua hacia la superficie del terreno durante el vuelo. Dependiendo de la velocidad y altura del avión o helicóptero, la tecnología actual permite obtener densidades de entre 0,2 y 50 pto/m².

- Antena GPS: el estándar es una antena que registra señales GPS a una frecuencia de 2 Hz. Esta antena es montada en lo alto de la aeronave para mejorar la recepción desde los satélites.
- Unidad IMU: este sistema permite registrar aceleraciones y rotaciones a un valor de frecuencia habitual de 200 Hz. Los valores de aceleración pueden ser usados para apoyar la interpolación de la posición de la plataforma en la trayectoria GPS, mientras que los valores de rotación son empleados en la determinación de la orientación de la plataforma. La combinación de los datos GPS e IMU permite reconstruir la trayectoria del avión con una precisión mejor que 10 cm.
- Unidad de control y registro de datos: Esta unidad es la responsable de sincronizar todas las lecturas obtenidas de los diferentes dispositivos, escáner, GPS e IMU. Los escáneres modernos, que registran 300.000 pulsos por segundo, generan cerca de 20 Gbytes de datos por hora, mientras que los datos GPS e IMU apenas suponen 0,1 Gbytes en el mismo tiempo.
- Ordenador portátil: sirve de medio de comunicación con la unidad de control y registro de datos, para seleccionar los parámetros de la misión y para monitorizar el funcionamiento durante el proceso.

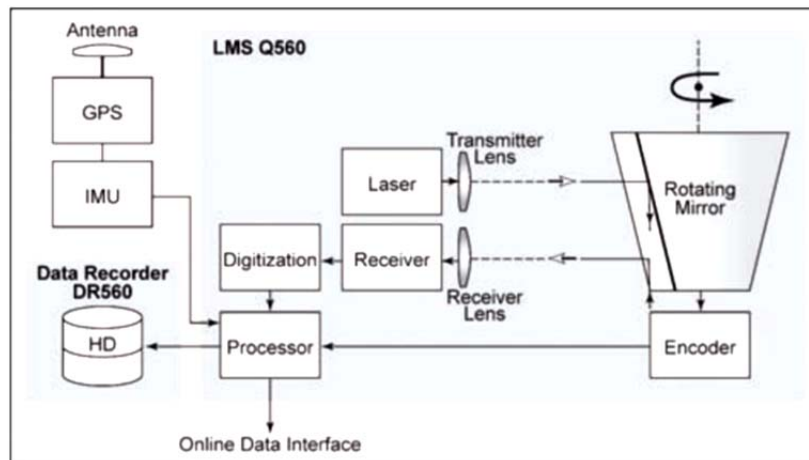


Figura 36: Componentes de un sistema LiDAR aéreo

2.3.2.2 Sistemas LiDAR mobile

Los primeros esfuerzos de investigación que precedieron al desarrollo de los sistemas montados sobre vehículo automóvil conocidos como Sistemas LiDAR mobile o también como MLSS, (*Mobile Laser Scanning System*), se centraban en la combinación de imágenes capturadas con múltiples cámaras digitales y de vídeo con los datos obtenidos de forma concurrente y con fines de geo-referenciación de unidades GPS e IMU (Shan et al., 2009). Inicialmente, fue una investigación pionera la llevada a cabo a finales de los años 80 por el Center for Mapping de la Universidad del Estado de Ohio, en Estados

Unidos, usando para ello su vehículo sensorizado “GPSVan” (Bossler et al., 1996; Toth et al., 2003, 2004). En paralelo, también se desarrolló un proyecto independiente en la Universidad de Calgary usando un vehículo similar, el VISAT van. En Europa, otros proyectos fueron asimismo llevados a cabo por Universidades o Instituciones como el EPFL de Lausanne (Photobus) o en España, el Instituto Cartográfico de Catalunya (GeoVan).

El desarrollo y uso de escáneres láser en plataformas vehiculares, en sustitución o en combinación con cámaras digitales, tuvo lugar algo más tarde. Las primeras investigaciones se desarrollaron en la Universidad de Tokyo (Manandhar et al., 2001, 2003), así como el vehículo GeoVan del Instituto Cartográfico de Catalunya (Talaya et al., 2004). Ambos proyectos combinaron cámaras con escáneres láser con el propósito de recoger datos de forma masiva.

Estos esfuerzos de investigación tuvieron como resultado el establecimiento, de un cierto número de compañías comerciales que desarrollaron sus propios vehículos basados en esta tecnología, inicialmente en Norte América (Estados Unidos y Canadá), y después también en otros países del mundo. Sus objetivos iniciales se fundamentaron precisamente en la recopilación de datos geospaciales con fines de inventario en carreteras. Hoy en día múltiples empresas se encuentran disponibles en el mercado para la adquisición de este tipo de información.

De forma similar a los sistemas Lidar aéreo, los componentes presentes en la mayoría de los equipos Lidar mobile actuales son los siguientes:

- Dispositivos de toma de imágenes: compuestos habitualmente por varias cámaras digitales que funcionan con diferentes resoluciones, (1 ó 2 Megapixels son comunes) y con una frecuencia que se encuentra en la mayoría de los casos entre 7 y 15 imágenes por segundo. El tipo de cámaras es muy variado en función del sistema comercial analizado pero es habitual contar con disposiciones que permiten una cobertura de 360º y toma zenital como el mostrado en la Figura 37.



Figura 37: Sistema de cámaras digitales integrado Ladybug3 (fuente: Petrie, 2010)

- Dispositivos de medida y escaneo láser: habitualmente formados por varios escáneres láser bidimensionales (de barrido 2D), ubicados de modo que se tenga una completa cobertura del entorno, cuya tercera dimensión es proporcionada por el propio movimiento del vehículo. El número de puntos que es capaz de medir el sistema depende del tipo y frecuencia de los escáneres láser montados, siendo posible encontrar en el mercado sistemas capaces de medir entre 40.000 y 1,3 millones de puntos por segundo. A modo de ejemplo, en la Figura 38 puede observarse un escáner 2D SICK utilizado en sistemas Lidar mobile.



Figura 38: Laser escáner SICK LMS 291 2D (fuente: Petrie, 2010)

- Dispositivos de posicionamiento (georeferenciación): están formados por una antena de doble frecuencia GPS o GNSS para la determinación de la posición del vehículo y de los sistemas de escaneo láser. Los sistemas GPS o GNSS funcionan en modo diferencial relativo a una estación base estática situada suficientemente próxima. Cuando la presencia de edificios altos en entornos urbanos, árboles en carreteras rurales, túneles u otros obstáculos generan una disminución o incluso una pérdida de la cobertura de los satélites que permiten el posicionamiento, es necesario el uso de una unidad de medición inercial (IMU) y de uno varios odómetros o decodificadores externos para mantener posicionado el vehículo. Los sistemas IMU disponibles son asimismo muy variados.
- Ordenador portátil y unidad de almacenamiento de datos: al igual que en los sistemas Lidar aéreo, el ordenador portátil permite la comunicación de los sistemas, la gestión del almacenamiento de los datos, la entrada de los parámetros correspondientes a cada trabajo, la monitorización y control del transcurso del mismo, así como la comprobación del correcto funcionamiento de los dispositivos.

En la Figura 39 pueden observarse los sistemas anteriores en un equipo IP-S2 de Topcon que son conectados a una unidad central de recepción y sincronización de datos.

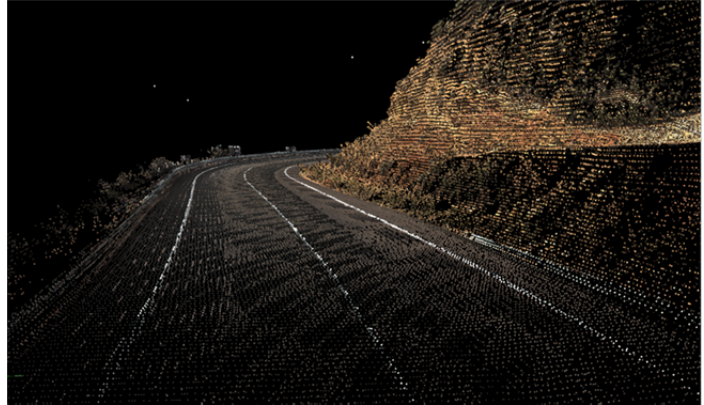
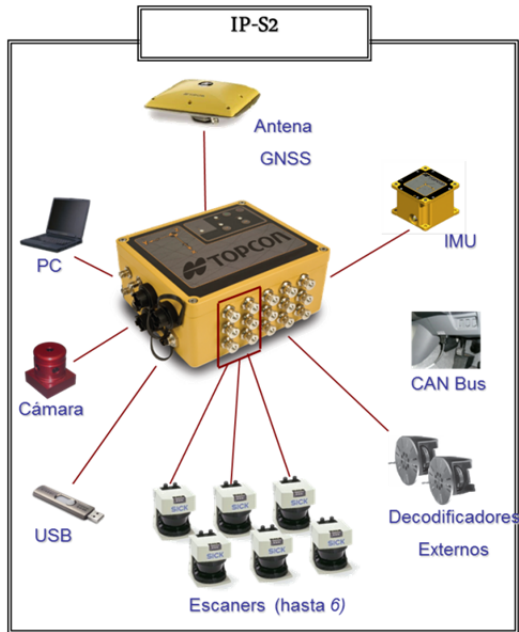


Figura 39: Componentes básicos de un sistema LiDAR Mobile IP-S2 (izquierda) y ejemplo de toma de nube de puntos obtenida con tres laser escáner SICK (derecha) (fuente: Topcon)

2.3.3 Precisiones de los sistemas LiDAR

Las compañías que fabrican escáneres láser estáticos o montados sobre plataforma móvil, ponen a disposición del usuario las precisiones de sus equipos, muchas veces con una marcada intencionalidad comercial orientada a destacar las ventajas de un producto concreto con respecto al resto de equipos de la competencia. Sin embargo, la experiencia demuestra que algunas veces esto no se debería tomar como valor real y que la precisión de los instrumentos, que se fabrican en series limitadas, varía de un instrumento a otro y depende de la calibración individual, del cuidado que se tenga en su uso y de otros muchos aspectos cuya revisión resulta conveniente realizar para entender y valorar la calidad de los datos obtenidos y las posibles limitaciones en su uso (Lerma et al., 2008).

Muchos han sido los estudios que han abordado distintos aspectos relacionados con la precisión de los sistemas basados en el escaneado láser, así, por ejemplo, Abshire y Gardner (1985) debatieron la influencia del índice de refracción atmosférica en el láser y propusieron un método de ajuste para el error de distancia. Hashemi et. al. (1994) estudiaron el problema de la fuente de error de una onda continua, proporcionando la ecuación de error estadístico de desviación estándar en el procesamiento de la señal digital. Schenk (2001) analizó la fuente de error del sistema aéreo de láser escáner, estableció el modelo de error correspondiente y propuso la corrección del método, mientras que otros estudios se han centrado en discutir los errores, las precisiones obtenidas con escáneres láser o el principio de posicionamiento para diferentes

aplicaciones (Huising et al., 1998; LiuShaochuang et al., 1999; Lichti et al., 2000; Jiang, 2001; Lichti et al., 2002; Johansson, 2002; Kern, 2003; Lichti et al., 2004).

Cada nube de puntos producida por un escáner láser puede contener un considerable número de puntos que presentan errores groseros. Si el producto entregado es una nube de puntos, la precisión no se puede garantizar de la misma manera que con instrumentos topográficos convencionales.

Cuando consideramos exclusivamente el proceso de escaneado láser, las fuentes de error se pueden dividir en 4 categorías: errores instrumentales, errores relacionados con el objeto, errores provocados por el entorno y errores metodológicos. Sus principales características se resumen a continuación:

➤ Errores instrumentales:

Los errores instrumentales pueden ser sistemáticos o aleatorios y se deben al diseño del escáner.

- Los errores aleatorios afectan principalmente a la precisión de la medida y la localización del ángulo en los sistemas de medición de tiempo de vuelo basados en pulsos.
- Los errores sistemáticos pueden ser generados por la no linealidad de la unidad de medición del tiempo o por la deriva de temperatura en la electrónica de medición del tiempo, que pueden provocar, entre otros problemas, deriva en la distancia.

Uno de los aspectos a tener en cuenta en los errores instrumentales, es la propagación del haz láser. Se debe saber que la divergencia del haz es la anchura que alcanza el haz con la distancia recorrida. La divergencia del haz tiene una fuerte influencia con la resolución de la nube, así como en la ambigüedad posicional del punto medido. La divergencia del haz se puede expresar de acuerdo con la expresión de la Ecuación 23.

$$w(\rho_w) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot \rho_w}{\pi \cdot w_0^2}\right)^2} \quad (23)$$

Siendo: ρ_w Distancia respecto de la circunferencia del haz
 w Radio del haz
 w_0 Radio mínimo del haz (en el punto inicial). Circunferencia del haz.

Se entiende que la reflexión del haz tiene una forma gaussiana. Para largas distancias, la divergencia es aproximadamente lineal y el diámetro del haz se expresa como la posición que engloba el 86% de toda la energía del haz con una distribución de irradiación gaussiana. La Figura 40 muestra 3 casos bien diferenciados:

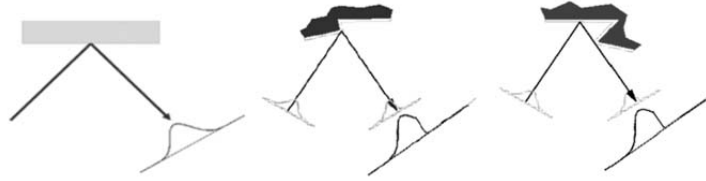


Figura 40: Reflexión ideal, iluminación parcial, oclusión parcial (fuente: Lerma et al., 2008)

En la práctica, la divergencia del haz tiene efecto en la localización del punto medido. La aparente localización del punto observado está en la línea central del haz emitido. Sin embargo, la localización real está en algún lugar de la huella del haz proyectada. Según Lichti, et al. (2004), la ambigüedad del haz es aproximadamente igual a un cuarto del diámetro del haz láser.

Otro de los aspectos a tener en cuenta en la divergencia del haz, es el problema del *borde partido*. Cuando un haz láser choca contra el borde de un objeto, el haz se divide en dos. Una parte se refleja en la primera parte del salto del borde mientras que la otra parte va más lejos, hasta alcanzar otra superficie (Figura 41). El resultado de ello es que la información de un pulso láser que llega al receptor lo hace desde dos puntos diferentes en el espacio. Las coordenadas de este punto, en relación con la posición del escáner, se calculan tomando la media de todas las señales recibidas para un mismo pulso y, por tanto, el punto se ubicará en un lugar incorrecto.

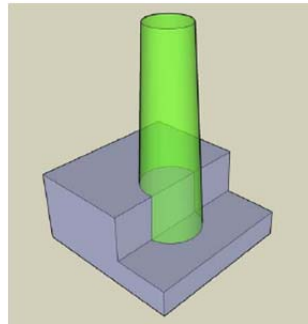


Figura 41: Problema del borde partido (fuente: Lerma et al., 2008)

Cuando se utiliza un escáner de alta resolución, la probabilidad de que el haz llegue a un borde aumenta y los datos resultantes mostrarán ruido justo detrás de los bordes de los objetos. Los escáneres con una anchura de haz menor disminuyen los efectos de este problema.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en los errores instrumentales, es *la ambigüedad en la distancia*. Se puede expresar en función de un número de parámetros según el tipo de escáner láser y su principio de funcionamiento. La mayoría de los

escáneres terrestres de medio y largo alcance proporcionan una ambigüedad en la distancia de entre 5 mm y 50 mm para una distancia de 50 m Beraldin et al. (2005).

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta es *la ambigüedad angular*. La mayoría de los escáneres láser utilizan espejos rotatorios para guiar la señal láser hacia una dirección determinada. Una diferencia angular pequeña puede provocar un error considerable en las coordenadas cuando la distancia al escáner aumenta. La precisión angular depende de cualquier error en la posición de los espejos y la precisión en la medición de los ángulos.

➤ Errores relacionados con el objeto.

Como los escáneres miden la reflexión del haz láser sobre la superficie, deben tenerse en cuenta las leyes físicas de la reflexión y las propiedades ópticas de los materiales. La reflexión de luz monocromática normalmente muestra rayos reflejados en muchas direcciones (Figura 42). Este tipo de reflexión isotrópica o difusa, se puede describir mediante la ley del coseno de Lambert, tal y como se expresa en la Ecuación 24.

$$I_{reflected}(\lambda) = I_i(\lambda) \cdot k_d(\lambda) \cdot \cos(\theta) \quad (24)$$

Siendo:	I_i	Intensidad de la luz incidente como función de una longitud de onda (color), la cual es absorbida cuando viaja por el aire.
	k_d	Coefficiente de reflexión difusa que también es función de la longitud de onda.
	θ	Ángulo entre la luz incidente y el vector normal a la superficie

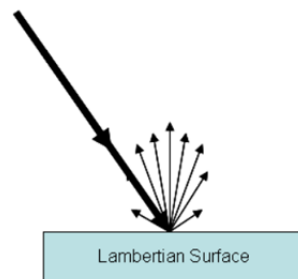


Figura 42: Reflexión sobre una superficie lambertiana (fuente: Lerma et al., 2008)

Esta fórmula muestra que el haz láser está afectado por la absorción de la señal que viaja por el aire, la reflexión del material sobre el que se mide y el ángulo de incidencia entre el haz láser y la superficie medida. Esto significa que para superficies muy oscuras o negras, que absorben la mayor parte del espectro, la señal reflejada será muy débil, por lo que la precisión del punto estará afectada por el ruido. Superficies con alta reflectividad, es decir, superficies brillantes, proporcionan unas mediciones más fiables y precisas. Sin

embargo, si la reflectividad del objeto es demasiado alta, como en superficies metálicas o cintas retro reflectantes, el haz láser es desviado totalmente y dará en otras superficies o se propagará por el aire libre. Esta desviación provoca que el punto medido no sea el punto al que apunta el láser, sino otro o ninguno. Este tipo de ruido se le denomina *ruido Speckle*.

El registro de superficies con reflectividad diferente también ocasiona errores sistemáticos en la distancia, algunas veces incluso de varias veces la desviación estándar de una simple medición. En la Figura 43 se puede apreciar la respuesta de la señal al incidir sobre diferentes superficies:

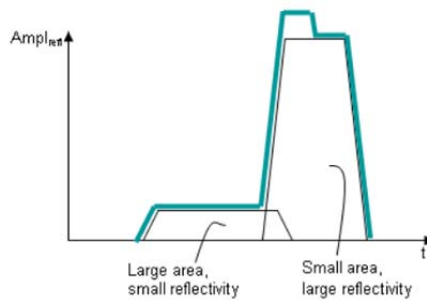


Figura 43: Respuesta de la señal cuando se escanean superficies con diferente reflectividad (fuente: Lerma et al., 2008)

Al igual que las propiedades de reflexión de la superficie, las propiedades del color también afectan a la precisión. Según Clark et al. (2004), existen discrepancias sistemáticas significativas en la distancia que, en términos generales, se pueden relacionar con el color de cada superficie y la longitud de onda del láser utilizado.

Aparte de los efectos de reflectividad, numerosos materiales presentan una capa semitransparente que permite pasar el haz láser refractándose y reflejándose en el propio material, como por ejemplo, la madera, el mármol y el poliestireno expandido (Figura 44). Estos efectos nos conducen a añadir una constante en las mediciones de la distancia, que debe ser considerada en su cálculo Ingesand et al. (2003).

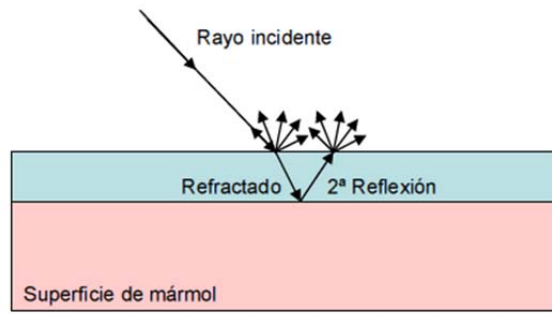


Figura 44: Efectos de la refracción en materiales semitransparentes no homogéneos (fuente: Lerma et al., 2008)

➤ Errores metodológicos

Los errores metodológicos se deben al método topográfico elegido o a la experiencia de los usuarios con esta tecnología. Por ejemplo, si el usuario establece una densidad de malla o resolución, más alta que la precisión por punto del escáner, el escaneado estará sobre-muestreado. Entonces, se genera mucho ruido extra y los tiempos de procesamiento se incrementarán de manera considerable. Otra causa de error puede ser una incorrecta elección del escáner (Lerma et al., 2008). Tomando un escáner con un alcance máximo próximo a la distancia máxima a la que se encuentra el objeto escaneado, los escaneados contendrán mediciones menos precisas y un posible ruido.

Los posibles errores generados durante la fase de registro o consolidación y durante el calibrado del equipo, también se encuentran en esta categoría.

➤ Errores provocados por el entorno.

Las condiciones ambientales son una de las fuentes de error en el escaneado láser, por lo que hay que tener en cuenta la temperatura, la atmósfera, la interferencia de radiación y la distorsión por movimiento.

En cuanto a la temperatura, cabe destacar que dentro del escáner puede alcanzar valores bastante superiores a la temperatura de la atmósfera circundante debido al calor interno o al calor resultante de la radiación externa, como por ejemplo, el Sol. Esta fuente de radiación externa podría, por ejemplo, calentar un lado del trípode en un escáner terrestre o del propio escáner, provocando que ese lado se dilate, distorsionando lentamente los datos tomados con el escáner.

De igual forma, además de la temperatura del equipo, también resulta importante la temperatura de la superficie escaneada. Cuando se escanea un objeto a alta temperatura, la radiación causada por las superficies calientes de fondo reduce la razón señal ruido y, por tanto, la precisión de las mediciones.

En cuanto a la atmósfera, cabe destacar que los escáneres láser solo funcionarán adecuadamente cuando se utilicen dentro de un cierto rango de temperatura. Incluso dentro de este rango se pueden observar desviaciones en las distancias.

Como en todas las operaciones de medición de distancias, los errores naturales provienen principalmente de las variaciones atmosféricas de temperatura, presión y humedad, lo que afecta al índice de refracción y modifica la longitud de onda electromagnética.

La mayoría del software propio de los sistemas de escaneo láser proporciona una corrección del índice de refracción al establecer un parámetro de refracción. Generalmente, los escáneres están preparados para usar los parámetros atmosféricos del estándar ISO (15°C; 1013,25 hPa). Cuando se trabaja bajo diferentes condiciones atmosféricas, estos parámetros se deben adaptar. Una diferencia de temperatura de 10°C o de una presión de 35 hPa produce un error en la distancia de 1mm/100m.

Cuando se trabaja en aplicaciones terrestres, este efecto no debería afectar seriamente a los resultados para cortas y medias distancias. Para distancias largas o mediciones de alta precisión es obligatorio aplicar los parámetros de corrección atmosférica.

Cuando se trabaja, por ejemplo, en una región montañosa, el descenso de temperatura se puede estimar en 0,65°C/100m y el descenso de presión en 10hPa/100m. Para un escáner estacionado a una altitud de 2000m, el error en la distancia por este concepto vendría a ser de unos 8mm/100m.

En cuanto a la interferencia de radiación, hay que tener en cuenta que los escáneres láser trabajan en una banda de frecuencia muy estrecha, por lo que la precisión en la distancia puede estar influenciada por una radiación externa, como por ejemplo las fuentes fuertes de iluminación externa. Se pueden aplicar filtros especiales de interferencia óptica para permitir que solo las frecuencias correctas alcancen el receptor.

Y por último, hay que tener en cuenta la distorsión por movimiento. La mayoría de los escáneres láser escanean a una velocidad de 2.000-500.000 puntos por segundo. Aunque son muy rápidos, en el caso de escáneres terrestres posicionados de forma estática, escanear a alta resolución puede llevar entre 20 y 30 minutos en el caso de los escáneres basados en el tiempo de vuelo, y sobre 10 minutos en los escáneres basados en la fase. Durante este tiempo el escáner es susceptible de vibraciones a su alrededor que produzcan movimientos.

Como cada punto se toma en un tiempo diferente, cualquier movimiento distorsionará los datos tomados. Por tanto, el escáner necesita estar montado en una plataforma estable para minimizar las vibraciones. El objeto escaneado debe permanecer estático también.

En este sentido, si el escáner se encuentra montado sobre una plataforma en movimiento, la calidad y precisión de los sistemas complementarios que permiten el cálculo en la posición y orientación del escáner, su frecuencia y sincronización, resultan de esencial importancia en la precisión global final.

➤ Errores propios de las plataformas móviles dotadas de sistemas de georreferenciación

Además de los errores propios de la acción de escaneado, los datos obtenidos desde plataformas móviles, contienen otras fuentes de error adicionales que se producen en el proceso de posicionamiento cinemático, sumándose a las anteriores y afectando a la precisión de los resultados finales. En este caso, la fuente de error es variable y al mismo tiempo difícil de controlar, por lo que las pruebas encaminadas a determinar el error y la compensación, son complejas y además propias de cada equipo. El análisis de la fuente de error razonable y completa de los sistemas LiDAR mobile, la comprensión y el dominio de la influencia de los errores en la precisión de posicionamiento, y la descomposición del error total en cada error primitivo, son la garantía fundamental para mejorar la calidad de los datos y la fiabilidad antes de su procesado (Wang et al., 2006).

- Error en el montaje:

Los diversos sensores utilizados, están todos montados sobre la misma plataforma de trabajo. Tras la instalación, los parámetros de montaje se deben determinar con precisión, incluyendo los parámetros de rotación y translación entre la antena GPS y el centro de emisión del reflector escáner (origen del barrido). Se trata, por tanto, de determinar los parámetros de transformación de coordenadas incluyendo la matriz de rotación y la matriz de translación.

- Error en la sincronización:

Para colocar el objetivo con exactitud, todas las observaciones deben estar realizadas al mismo tiempo, es decir, observación simultánea.

Los diferentes sensores de un sistema Lidar mobile tienen sus respectivos sistemas de medición del tiempo, por lo que una fusión eficaz de estos datos, depende de la sincronización de los tiempos entre los diferentes sensores. Solo la toma de datos sincronizada puede asegurar la posición real espacial del láser escáner, y por consiguiente de los puntos determinados a partir de él (Morin, 2002).

- Error en la interpolación:

Dado que la frecuencia de medición/grabación de los diversos sensores puede ser bastante diferente, es necesario recurrir a interpolaciones que serán diferentes en función del modelo matemático utilizado. La linealización de un modelo no lineal es el principal factor que influye en esta fuente de error.

2.3.4 Modelos digitales del terreno y modelos digitales de superficies obtenidos a partir de datos LiDAR

Un Modelo Digital del Terreno (MDT) es un conjunto ordenado de números que representa la distribución espacial de características del terreno (Doyle, 1978). Esta forma matemática de representar las características del terreno en formato digital, permite su tratamiento mediante el uso de ordenadores.

Por su parte, Felicísimo, (1994) define un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) como “una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno”. Esta definición pretende distinguir las características de altitud de otras características del terreno que pueden conformar en sí mismas un MDT tal y como quedaba definido por Boyle ya en 1978. En la presente tesis doctoral nos referiremos en adelante al MDT como el modelo digital que representa las características de elevación de la superficie del terreno.

Estos modelos han resultado esenciales en diferentes áreas de aplicación, tales como riesgos de inundación, planes y proyectos de infraestructuras, estudios medioambientales..., y hoy en día es un dato fundamental en los sistemas de información geográfica GIS (Vosselman et al., 2010). Un MDT puede generarse de diversas formas, siendo los datos de un escaneado láser aéreo o terrestre una de las fuentes de información que permiten su obtención.

Un Modelo Digital de Superficies (MDS) ó también llamado *Digital Canopy Model*, (DCM) describe la superficie más elevada visible desde arriba (Vosselman et al., 2010). Es muy común su uso en el área de mapeo topográfico, especialmente con propósitos de visualización. Un MDS es equivalente a MDT en áreas abiertas, pero el MDS describe la cobertura vegetal como el límite de la superficie más elevada e incluye también las construcciones hechas por el hombre, tales como los edificios. Sin embargo, debido a la dificultad de eliminar los objetos de un terreno, el MDS a veces incluye coches y otros objetos presentes durante la adquisición de los datos. La Figura 45 muestra la diferencia entre un MDS y un MDT.

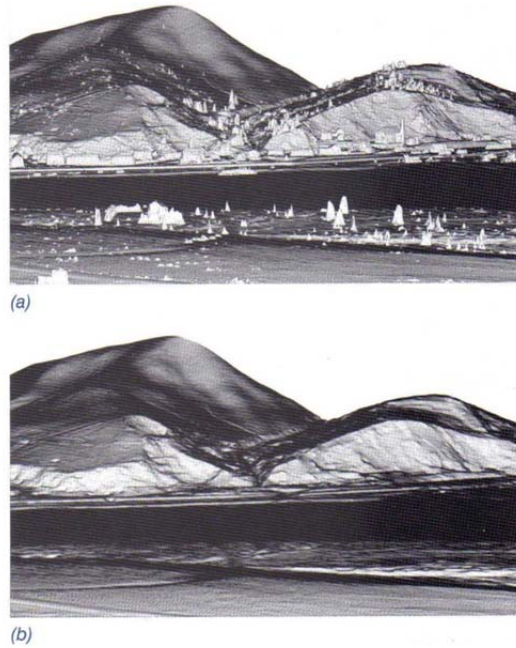


Figura 45: a) Modelo Digital de Superficies; b) Modelo Digital del Terreno (fuente: Vosselman et al., 2010)

En el pasado, la fotogrametría analítica era la principal técnica de medida para generar estos modelos en grandes áreas con una alta precisión en torno al decímetro ó centímetro. En los últimos años, han estado además disponibles técnicas de medidas muy automatizadas, tales como el escaneado láser, la correspondencia automática de imágenes o la interferometría radar de apertura sintética (*Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR*) (Vosselman et al., 2010).

Todas estas técnicas tienen en común un muestreo muy denso del área de interés en un tiempo reducido. Sin embargo, en comparación con los sistemas manuales de adquisición de datos, donde la interpretación y extracción de la topografía se realiza por el hombre de forma interactiva, estos sistemas automatizados no se guían por una interpretación simultánea de la escena. La interpretación, normalmente se hace por separado en el post-proceso y puede ser adaptada a una aplicación individual.

Para la generación de un MDT con datos generados de manera automática, es necesario que en esa fase de post-proceso, se extraigan los datos relevantes del suelo desnudo para el conjunto de toda la información. Esta tarea no es más que una clasificación de los datos topográficos adquiridos de manera automática, distinguiendo los puntos que pertenecen al terreno y los que no. Una vez realizada esta labor, el MDT puede ser generado por métodos de interpolación apropiados.

Clasificación de nubes de puntos LiDAR:

Dado que durante la adquisición de datos LiDAR no se lleva a cabo una interpretación simultánea de la escena, es necesaria una clasificación que localice los puntos del terreno y los distinga del resto.

Son muchos los algoritmos desarrollados para la clasificación de datos LiDAR, una visión general de los cuáles puede encontrarse en Sithole and Vosselman (2004), Sithole and Vosselman (2005) y Klober et al. (2007).

Generación de un MDT:

Un modelo digital del terreno se genera a partir de un conjunto de observaciones tales como puntos y líneas. Basada en estas observaciones, se puede determinar una cierta función f que represente el terreno dentro de un área localizada. Habitualmente, un MDT está limitado a una representación 2,5D utilizando la función $z=f(x,y)$, donde se localiza un cierto valor de z , para cada punto 2D de coordenadas x e y (Vosselman et al., 2010). Aunque no son las más comunes, las formulaciones 3D pueden requerirse en ciertas áreas de detalle tales como aquellas en las que existan voladizos o puentes. Una discusión sobre la generación de modelos del terreno 3D puede encontrarse en Pfeifer (2005).

Un formato de datos muy conocido para el almacenamiento de MDTs, es la representación Raster. Dentro de esta estructura, cada valor del raster representa la altura de un área cubierta por el elemento raster. Otro formato también común en MDTs es el formato grid o rejilla que representa información de la altura del terreno en puntos organizados de manera regular. Cuando el formato grid de puntos incluye además líneas, se puede hablar de un modelo en rejilla híbrido (Ackermann and Kraus, 2004, Figura 46a).

Un método diferente para la generación de una representación del terreno es la triangulación (Triangulated Irregular Network, TIN). En este proceso, se generan triángulos a partir de los puntos que forman el conjunto de datos de partida mediante ciertas reglas geométricas (la más empleada es la triangulación Delaunay). Las generaciones TIN permiten además la integración de estructuras lineales como pueden ser líneas de rotura del terreno, lo que mejora los resultados y la fiabilidad del modelo haciendo intervenir nuevos nodos que modifican la red de triángulos inicial (Figura 46b).

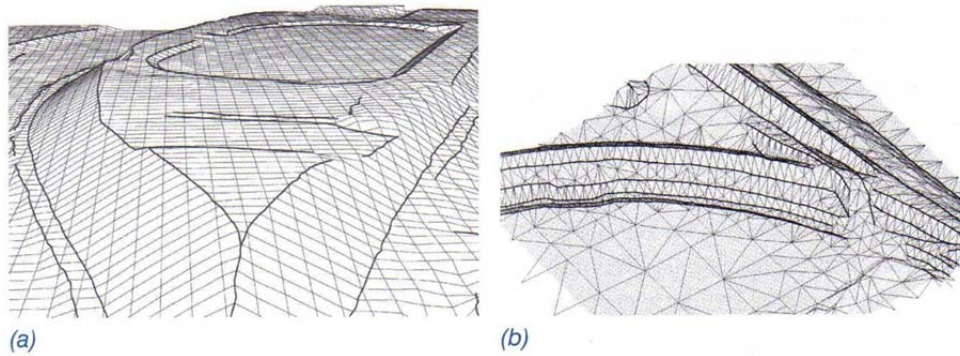


Figura 46: Estructura de líneas estimadas según los datos de un escaneado láser aéreo. a) vista de MDT formado a partir de un modelo en rejilla híbrido; b) vista de un MDT formado a partir de TIN (fuente: Vosselman et al., 2010)

Para la representación del MDS se puede usar la misma estructura de datos y los mismos métodos de interpolación que en el MDT, sin embargo, a diferencia del MDT, normalmente el proceso de suavizado que habitualmente acompaña a toda generación de un MDT, se reduce lo máximo posible con el fin de conseguir una exacta representación del límite del objeto.

La mayor diferencia en comparación con un MDT, son los datos de entrada ya que el MDS se suele calcular a partir del primer eco del haz laser, no obstante, es necesario resaltar que la toma automática de los puntos correspondientes al primer eco puede generar errores groseros tales como los causados por los pajaros o por el polvo, o puede que se incluyan puntos pertenecientes a objetos temporales que hayan estado presentes durante el tiempo de adquisición, como vehículos estacionados o en movimiento, personas, etc. (Vosselman et al., 2010).

Modelo digital del terreno a partir de datos de un escaneado láser terrestre estático:

La generación de un área local 2.5D de un MDT a partir de datos de escaneado láser terrestre estático (no montado sobre plataforma móvil) funciona de manera análoga a la generación de un MDT a partir de datos de escaneado láser aéreo (Briese et. al., 2002). Antes de filtrar una nube de puntos de un escaneado láser terrestre estático, todos los estacionamientos deben estar referidos al mismo sistema de coordenadas. La principal diferencia de este tipo de escaneado láser con respecto a un escaneado láser aéreo, es la poca homogeneidad en la distribución de los datos. Esta falta de homegeneidad es debido a la baja altura de observación lo que lleva a tener una alta densidad de puntos en las proximidades del estacionamiento que se reduce significativamente con la distancia. Además, se tienen que considerar los efectos de oclusión (sombra) que en este caso, tienen mayor importancia.

Calidad del modelo digital del terreno.

La calidad de un MDT puede dividirse en dos partes, por un lado la relativa a la calidad de los datos de entrada, y por otro, a la calidad del propio modelo (Karel et. al., 2006).

Calidad de los Datos:

Para analizar la calidad de los datos de entrada se recurre normalmente a visualizaciones gráficas que permiten detectar inconsistencias en los datos e interpretar las fuentes de error, las más habituales en este análisis son: (Vosselman et al., 2010)

- Capa de densidad de puntos: La visualización de la densidad de puntos en una imagen raster permite detectar áreas con pocos puntos a las que prestar especial atención y aportar información sobre las áreas de interpolación y extrapolación.
- Mapa de distancia de puntos: Es similar al mapa de densidad de puntos, solo que permite la detección de áreas con una baja cantidad de datos de entrada. Proporciona información acerca de la distancia al punto más cercano.
- Mapa de clase de datos: Visualiza la clase de ciertos datos de entrada, como por ejemplo, el láser escaner, el láser escáner terrestre estático y los puntos medidos con fotogrametría, en una cierta región.
- Mapa de precisiones: Representa una visualización de las zonas con mayor o menor precisión.

En la Figura 47 puede observarse una imagen gráfica en la que, mediante colores, se analizan las diferencias de cota entre los datos Lidar de una franja de terreno solape de dos pasadas de escaneado aéreo. En este caso, se aprecian mayores diferencias en zonas con vegetación que en zonas abiertas planas.

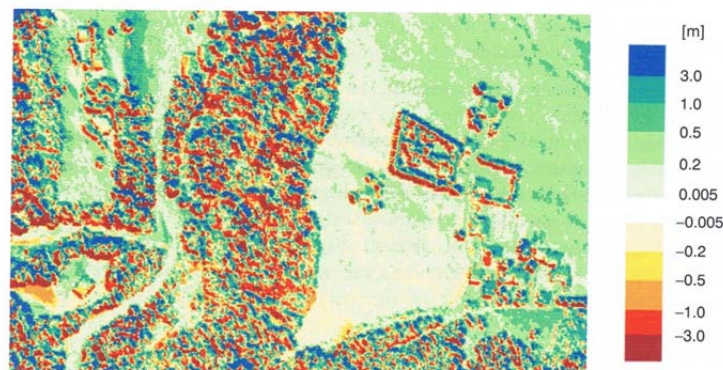


Figura 47: Inconsistencias entre dos conjuntos de datos procedentes del solape de dos pasadas de escaneado láser aéreo (fuente: Karel et al., 2006)

Otra comprobación gráfica de la consistencia de los datos se muestra en la Figura 48 en este caso, dentro del conjunto de datos correspondiente a una misma pasada del que se visualizan las diferencias entre los datos obtenidos a partir de un espejo (de distribución del haz láser) girando de izquierda a derecha de otro con giro en sentido contrario.

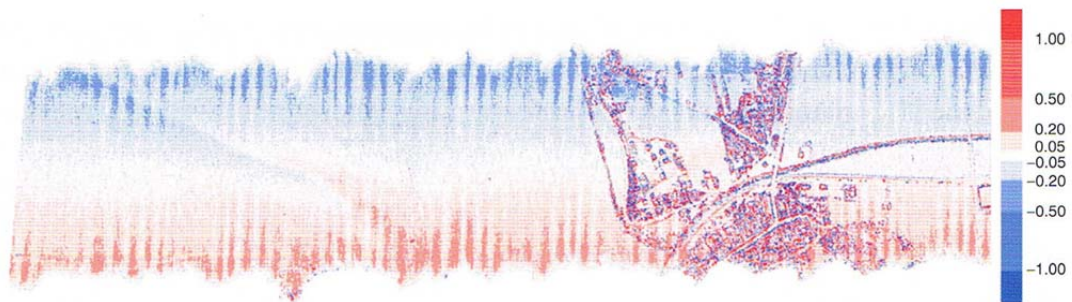


Figura 48: Inconsistencias dentro de un mismo conjunto de datos procedentes de un escaneado láser aéreo debidas a un deficiente funcionamiento del equipo (fuente: Karel et al., 2006)

La calidad del filtrado se debe considerar, como la mejor o peor separación de los puntos del terreno de los que no lo son, especialmente en el caso de los datos de un escaneado láser aéreo. Mientras que esta clasificación puede ser segura en algunas áreas concretas en donde la complejidad del terreno sea inferior, se pueden dar errores en la clasificación en áreas donde exista una disposición compleja orográfica o de edificaciones (Sithole et al., 2004).

Calidad del Modelo:

Por su parte, la calidad del modelo de un MDT se puede separar en dos conceptos diferentes: calidad interna y calidad externa (Vosselman et al., 2010).

La calidad interna describe la calidad de un MDT estimado en comparación con la observación del terreno inicial que constituye los datos de partida. Para determinar dicha calidad habitualmente se aplica el error medio cuadrático (*Root Mean Square Error*, RMSE). Los mapas de RMSE representan la diferencia entre los datos de entrada y el MDT derivado, y ayuda a detectar áreas donde existe una diferencia significativa entre los datos de entrada y el modelo.

Por su parte, la calidad externa de un MDT describe la calidad de un MDT estimado en comparación con los datos de control externos. Mientras que la calidad interna se puede estimar solo con los datos de entrada, para la calidad externa es necesario contar con datos de referencia externos que no forman parte de los datos de entrada. Para

garantizar el proceso, estos datos externos no se deben usar para generar el MDT y además deben contar con una mayor precisión.

Con el fin de analizar la calidad exterior de un MDT proveniente de un escaneo láser aéreo, se han publicado varios documentos en los que se han comparado resultados de escaneados láser aéreos, con datos de control medidos de forma independiente. Pfeifer et al. (2001) situaban la media del RMSE de un escaneo láser aéreo en el entorno de $\pm 0,11\text{m}$ y destacaban la enorme dependencia del RMSE del tipo de superficie. Mientras el RMSE se encontraba por debajo de $\pm 0.1\text{m}$ en terreno abierto, e incluso inferior en áreas muy bien definidas como áreas pavimentadas, el RMSE puede aumentar significativamente en áreas con cobertura vegetal. Otros autores, han llegado también a resultados similares de la calidad según un análisis exterior (Hyypä et al., 2000; Wack et al., 2005).

Además de las técnicas ya mencionadas para la descripción de la calidad del modelo, también se usan fórmulas empíricas que proporcionan un medio para describir la calidad del modelo a partir de un análisis empírico basado en múltiples observaciones y MDT. Para estimar la precisión en la altura de un MDT derivado de una pequeña huella de datos del escáner láser aéreo, Karel et al. (2006) propusieron la expresión de la Ecuación 25.

$$\sigma_z[\text{cm}] = \pm \left(\frac{6}{\sqrt{n}} + 30 \cdot \tan(\alpha) \right) \quad (25)$$

Siendo:

σ_z	Precisión del MDT en cota (cm)
n	Densidad de puntos (Puntos/m ²)
$\tan(\alpha)$	Pendiente del terreno

Kraus et al. (2006) describen asimismo una alternativa de estimación de un MDT procedente de un escaneo láser aéreo basada en los datos originales y el propio MDT.

2.4 LA TECNOLOGÍA LIDAR APLICADA A LA OBTENCIÓN DE VISIBILIDADES

Las posibilidades generadas en la obtención de visibilidades gracias a la disponibilidad de nubes formadas por miles de puntos geo-referenciados, con errores de posicionamiento milimétrico o centimétrico en función de los equipos empleados y de las distancias consideradas, ha sido analizado en diferentes investigaciones (Khattak et al., 2003; Khattak et al., 2005; Tsai et al., 2010; Charbonier et al., 2010; Kerdudo et al., 2008; Constantinos et al., 2012; Ibáñez et al., 2012; Teizer et al., 2010).

En este apartado se hace un recorrido por las metodologías empleadas, habiéndose analizado no solo las que han sido desarrolladas para su aplicación en estudios o proyectos relacionados con la ingeniería de carreteras, sino también aquellas otras que, aun no estando directamente concebidas para este tipo de ingeniería, poseen una sistemática cuya base conceptual sí podría ser susceptible de aplicación en este campo.

2.4.1 Visibilidades obtenidas mediante modelos 3D generados a partir de datos LiDAR

La aplicación de la tecnología LiDAR a la seguridad vial en carreteras ha sido objeto de investigación desde que comienza a estar disponible en labores topográficas como una nueva forma de levantamiento masivo de puntos del entorno. Inicialmente, los datos LiDAR provenían de vuelos específicos o de escáneres estáticos, siendo más reciente el desarrollo de los sistemas LiDAR mobile montados sobre un vehículo en movimiento.

Así, por ejemplo, Khattak et al. (2003) aplicaron datos LiDAR aéreos a la localización de potenciales obstrucciones a la visión en intersecciones de carreteras. El estudio se centró en varias ubicaciones seleccionadas atendiendo a su accidentalidad en las que se analizaron las líneas de visión obtenidas dentro de los triángulos de visibilidad (Figura 49).

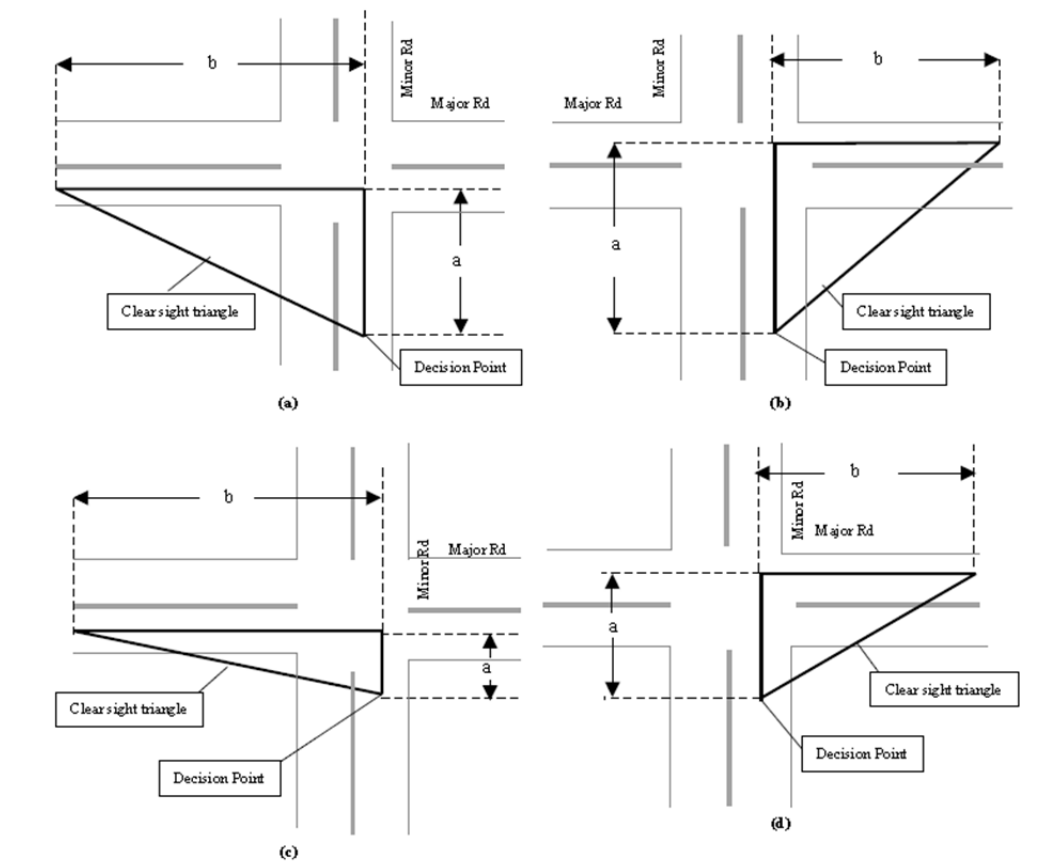


Figura 49: Triángulos de visibilidad considerados en una intersección según Khattak et al. (2003) (fuente: Khattak et al., 2003)

Los datos Lidar se emplearon para obtener información de elevación, mientras que los datos de planta fueron obtenidos de ortofotos de la intersección (Figura 50). Ambas fuentes de información se combinaron posteriormente en un sistema de información geográfica (SIG).

Para la obtención de visuales se generó una superficie TIN (Triangular Irregular Network, Figura 51) sobre la que un ordenador de la época, compuesto por un procesador de 1 MHz con 256 Mb de memoria RAM, requirió, según el estudio, un “*considerable tiempo de proceso*”, que no llega a cuantificar.

La implementación de la superficie TIN sobre la extensión 3D Analyst de Arcview, permitía obtener líneas de visión desde un observador hasta un punto objetivo de alturas conocidas, lo que además permitía identificar la posición del obstáculo en caso de que existiera.

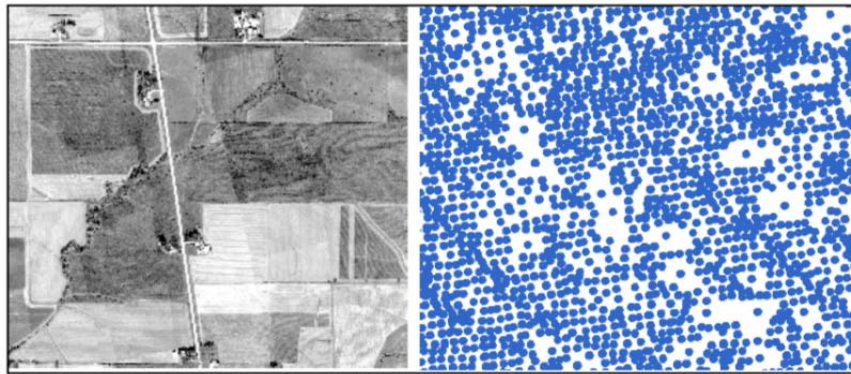


Figura 50: Ortofoto y datos LiDAR empleados por Khattak et al. (2003) (fuente: Khattak et al., 2003)

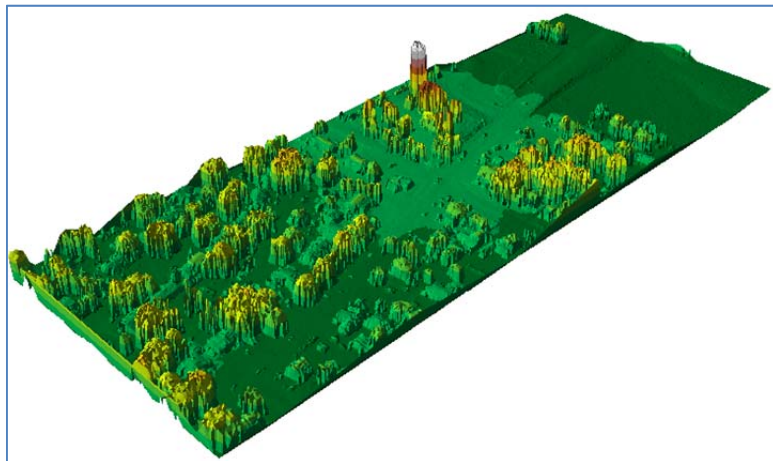


Figura 51: Superficie TIN generada a partir de los datos LiDAR correspondientes a un modelo digital de superficies (MDS) (fuente: Khattak et al., 2003)

Es interesante resaltar que la superficie TIN se obtuvo tanto para el primer rebote del haz láser, como para el último, lo que viene a traducirse en el empleo de la superficie 3D correspondiente a un modelo digital de superficies y a un modelo digital del terreno respectivamente.

La existencia de visión se representó por una línea visual trazada entre el observador y el objetivo de color verde, que se torna en color rojo desde el punto en que se encuentra un primer obstáculo. En la Figura 52 pueden observarse las líneas de visión trazadas desde dos observadores, habiéndose representado por un punto de color más grueso el lugar donde estas líneas encuentran su primera interrupción a la visión.

Los obstáculos identificados en el proceso fueron confirmados con visitas de campo y tomas de vídeo. En el estudio se menciona, aunque no se analiza, la influencia de la precisión de los datos LiDAR sobre la identificación de obstáculos y su efecto real sobre la visión obtenida, aunque se indica que se llegaron a identificar correctamente cerca del 90% de los obstáculos obtenidos mediante visitas de campo y grabaciones de vídeo, concluyéndose que, a pesar de que es necesaria una mayor investigación, las técnicas LiDAR pueden ser incorporadas en el estudio de visibilidades para la mejora de seguridad vial.

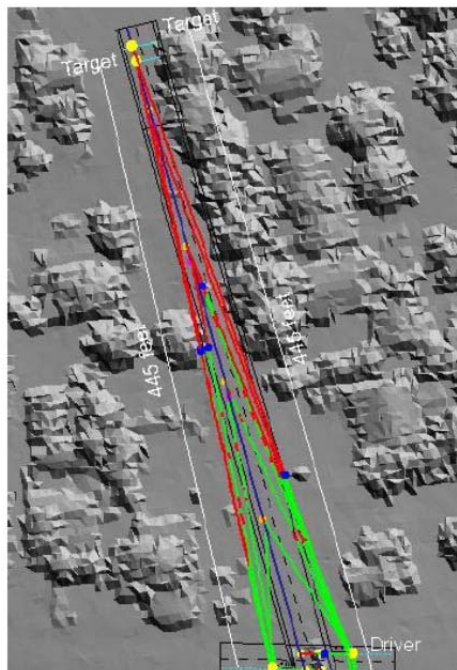


Figura 52: Líneas visuales obtenidas con la localización de sus obstrucciones (fuente: Khattak et al., 2003)

En 2005, Khattak y Shamayleh aplicaron la misma metodología basada en líneas de visión al análisis de distancias de visibilidad de parada y adelantamiento. Los datos de partida fueron asimismo datos LiDAR aéreos y se emplearon de nuevo superficies TIN y

herramientas GIS (ArcView). La comprobación de campo concluyó de nuevo una buena identificación de obstáculos, aunque seguían produciéndose algunos errores que, según los autores, requerían ser investigados, generados por circunstancias tales como la existencia de voladizos de edificios, o la vegetación que sobrevuela el tronco de los árboles. Ambos casos podría producir falsos obstáculos en el modelo digital de superficies empleado en la obtención de líneas de visión.

Castro et al. (2011) también desarrollaron un procedimiento de obtención de visibilidades a partir de herramientas GIS. En este procedimiento, el modelo digital del terreno es dato necesario para la obtención de resultados, sin embargo, tal y como refieren los autores, el método puede aplicarse a un modelo digital de superficies obtenido a partir de datos LiDAR, incorporando entonces datos relativos a obstáculos potenciales a la visión tales como árboles o edificaciones que no son consideradas en modelos digitales sólo del terreno. El software GIS desarrollado fue asimismo optimizado para reducir los tiempos de proceso (Castro et al., 2014) y posteriormente se integró además un modelo de predicción de velocidad y de estimación de consistencia para obtener resultados conjuntos con la visibilidad disponible (Castro, 2015a).

La influencia de la resolución del modelo digital del terreno en los resultados de visibilidad disponible obtenidos por estas técnicas GIS, así como de la distancia entre puntos de cálculo a lo largo del trazado considerado, fue asimismo objeto de análisis por Castro et al. (2015b) concluyendo en un importante efecto de la resolución del MDT y superior a la que introduce la distancia entre puntos de cálculo.

En esta línea, Santos-Berbel et al. (2014) emplearon datos LiDAR para la obtención tanto de un modelo digital del terreno (MDT) como de un modelo digital de superficies (MDS) y la metodología de cálculo GIS desarrollada por Castro et al. (2011). En el primer caso (MDT) con datos procedentes de LiDAR aéreo mientras que en el segundo (MDS) se emplearon dos fuentes de información, de nuevo datos LiDAR aéreo para obtener el primer MDS y datos LiDAR mobile para obtener un segundo MDS. Los resultados obtenidos por los tres modelos fueron sometidos a análisis concluyendo en una mejor representación de la realidad de la visión mediante MDS procedentes de LiDAR especialmente en carreteras sinuosas con abundante vegetación u otros elementos perceptibles en las márgenes.

Los estudios de inundación fueron el origen de la información de partida empleada en otra investigación llevada a cabo por Tsai et al. (2010), en la que se recurrió a datos LiDAR obtenidos para estudios de avenidas. En esta investigación se desarrolló una nueva metodología para la obtención de visibilidades en intersecciones basada en datos LiDAR aéreo que emplean, en lugar de líneas de visión (line-of-sight, LOS) como hacía Khattak et al. (2003), planos de visión (plan-of-sight, POS). Los resultados obtenidos con esta metodología basada en POS se compararon con la metodología hasta ese momento existente basada en LOS y con análisis de visibilidades en campo concluyéndose que la

nueva metodología era capaz de identificar el 92% de los obstáculos de las ubicaciones sometidas a estudio, frente al 64% del método basado en LOS.

Para ello, emplearon una superficie 3D generada a partir de los datos LiDAR así como un análisis espacial basado en GIS. La superficie 3D es generada como un TIN a partir de los datos LiDAR del primer rebote del haz láser, constituyendo por tanto un análisis basado en un modelo digital de superficies (Figura 53).

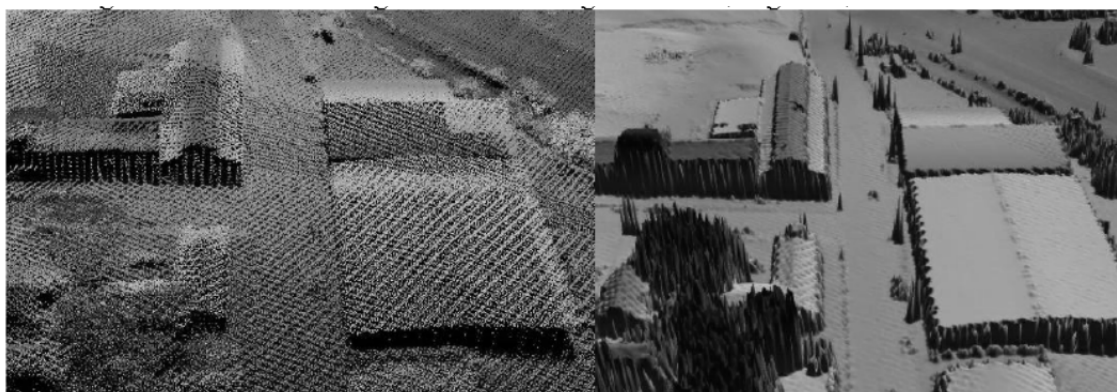


Figura 53: Nube de puntos LiDAR original y Modelo Digital de Superficies obtenido a partir de ella (fuente: Tsai, et al., 2010)

Charbonier et al. (2010), llevaron a cabo un análisis comparativo entre dos sistemas para determinar la distancia de visibilidad máxima disponible a lo largo de la carretera, uno basado en estereovisión y otro basado en datos LiDAR mobile.

En este caso, los datos LiDAR mobile fueron también transformados en una superficie 3D mediante triangulación, y la visibilidad disponible fue obtenida alejando progresivamente un objetivo del punto de observación hasta que la línea de visión intersectara a la superficie 3D generada.

En este estudio, la presencia de vehículos estacionados o detectados en maniobras de adelantamiento, son previamente eliminados de la nube de puntos mediante la detección de los bordes de la carretera y la supresión de todos los puntos situados por encima de su superficie. Por motivos computacionales y de tiempo de proceso, el número de triángulos que se generarían, al aplicar directamente la muestra de puntos inicial, es sometida a reducción, dejándola en magnitudes del 10% o inferiores.

Para sistematizar la obtención de visibilidades disponibles, se desarrolló una aplicación informática (Qt-Ballad) que calculaba la distancia a la que un objetivo dejaba de ser visible para un punto de observación alejándolo progresivamente de éste a intervalos constantes predefinidos (Figura 54).

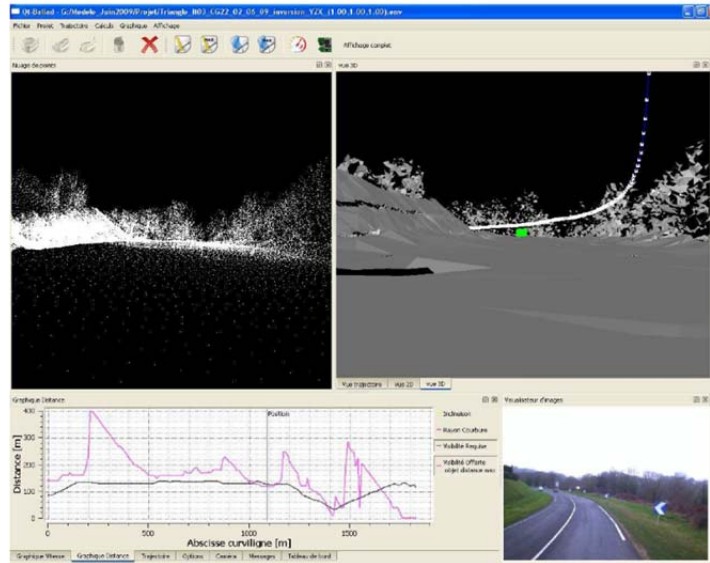


Figura 54: Interface del software Qt-Ballad empleado en el cálculo de visibilidades disponibles (fuente: Charbonier et al, 2010)

Los resultados se contrastaron con las visibilidades obtenidas mediante observación directa de dos vehículos en seguimiento circulando a distancia constante entre ellos de intervalos dados: 50, 65, 85, 105, 130, 160, 200, 250 y 280 m. La forma de proceder para calcular visibilidades mediante vehículos en seguimiento, que es tomada como referencia, es descrita por Kerdudo et al. (2008).

El estudio concluyó en una mejor aproximación a las visibilidades resultantes de los vehículos en seguimiento de las técnicas basadas en datos LiDAR que de aquellas desarrolladas por estéreo-visión para el tramo analizado (Figura 55), aunque se ponen de manifiesto las limitaciones de contar con una visibilidad máxima de 280 m en la metodología de referencia.

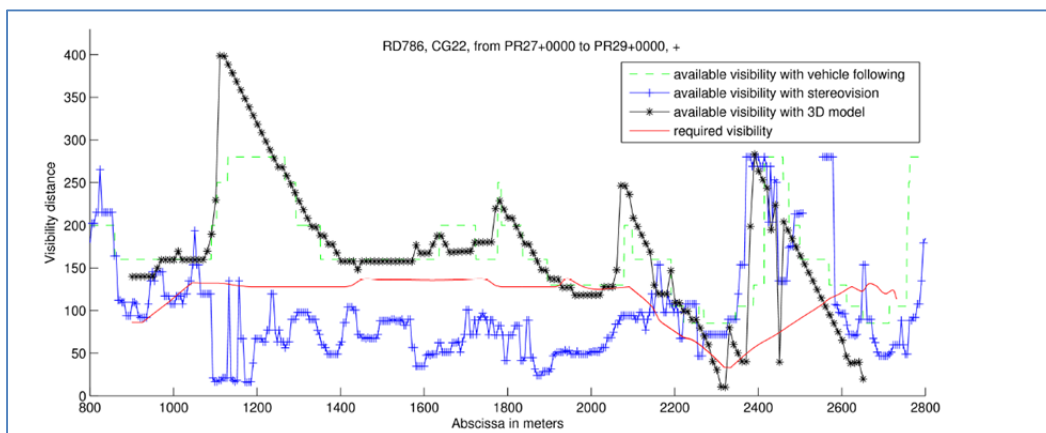


Figura 55: Comparación gráfica de visibilidades disponibles obtenidas a partir de datos LiDAR, estéreo-visión y vehículos en seguimiento (fuente: Charbonier et al, 2010)

En este estudio se advierte, no obstante, de los elevados costes computacionales y las necesidades de simplificar la triangulación para hacer viable el análisis de largos tramos de carretera, sin que se llegue a cuantificar la pérdida en la precisión de resultados que ello pueda llegar a suponer.

Constantinos et al. (2011), emplearon también datos LiDAR procedentes de escáneres láser terrestres estáticos para determinar la visibilidad disponible en intersecciones ubicadas tanto en entorno urbano como interurbano.

Para abordar los estudios de visibilidad se requiere de nuevo la construcción previa de un modelo 3D generado a partir de la nube de puntos original, que debía encontrarse previamente depurada para eliminar el “ruido” provocado por el tráfico circulante mientras se producía la captura de datos.

La Figura 56 muestra los planos de visión generados cuyo planteamiento coincide con el anteriormente descrito por Tsai et al. (2010) basado en POS (plan-of-sight). A partir de los planos de visión, Constantinos et al. (2011) obtuvieron distancias de visibilidad que fueron comparadas con la distancia de visibilidad de parada requerida según la velocidad de aproximación a la intersección.

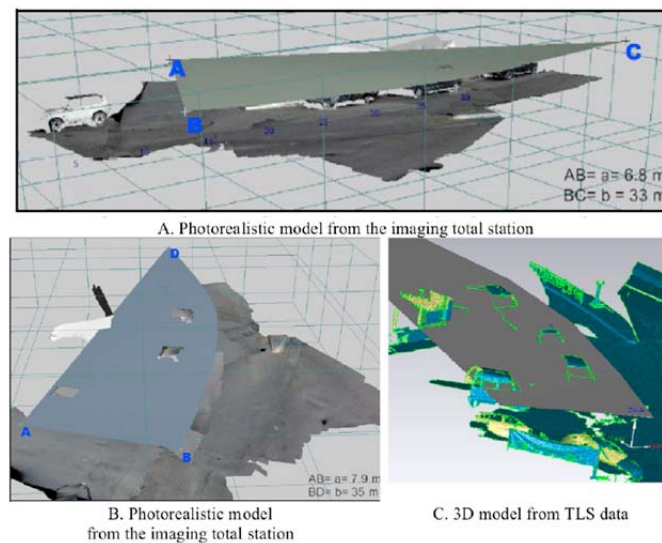


Figura 56: Modelo 3D generado a partir de datos LiDAR terrestres y planos de visión obtenidos (fuente: Constantinos et al., 2011)

2.4.2 Visibilidades obtenidas mediante secciones transversales generadas a partir de datos LiDAR

Sin que constituya una metodología completamente diferente, las nubes de puntos LiDAR pueden ser empleadas como datos de partida para la confección de secciones transversales de modo que puedan constituir el punto de partida del cálculo de visibilidades a partir de los algoritmos habitualmente contenidos en los programas comerciales de trazado de carreteras.

Esta forma de proceder, puesta de manifiesto por Ibáñez et al. (2012) pretende la conversión de una sección transversal ortogonal al eje de la carretera que contenga los puntos LiDAR obtenidos en el escaneo, en una sección transversal simplificada formada por líneas que simulen el contorno envolvente de dicha nube de puntos (Figura 57).

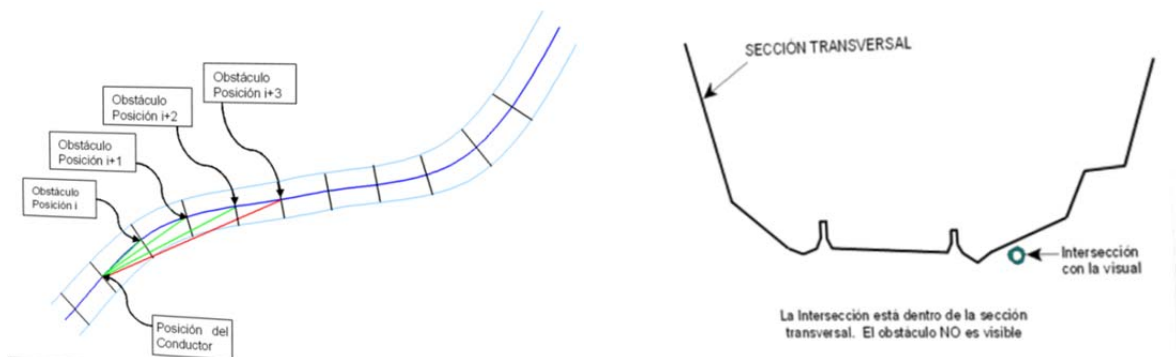


Figura 57: Obtención de visibilidades mediante secciones transversales obtenidas a partir de datos LiDAR (fuente: Ibáñez, et al., 2012)

2.4.3 Visibilidades obtenidas mediante algoritmos Ray-tracing aplicados directamente a la nube de puntos LiDAR.

Tal y como se ha expuesto en apartados anteriores, las metodologías descritas hasta aquí requieren de la transformación de la nube de puntos generada en el escaneo láser, ya sea en superficies 3D continuas, o bien en secciones transversales, siendo éstas las habitualmente empleadas en los análisis de visibilidad llevados a cabo por los programas comerciales de trazado de carreteras.

Sin embargo, existen otras metodologías para obtener áreas visibles desde una posición concreta del observador directamente a partir de una nube de puntos LiDAR. Teizer et al. (2010) analizaron los “ángulos muertos” de maquinaria pesada de obra pública mediante una sistemática de cálculo basada en una nube de puntos LiDAR. Dicha nube de puntos es adquirida mediante un láser escáner estático comercial situado dentro de la cabina de la máquina analizada (Leica Scanstation 2), a una altura equivalente al punto de vista de un conductor tipo (Figura 58).

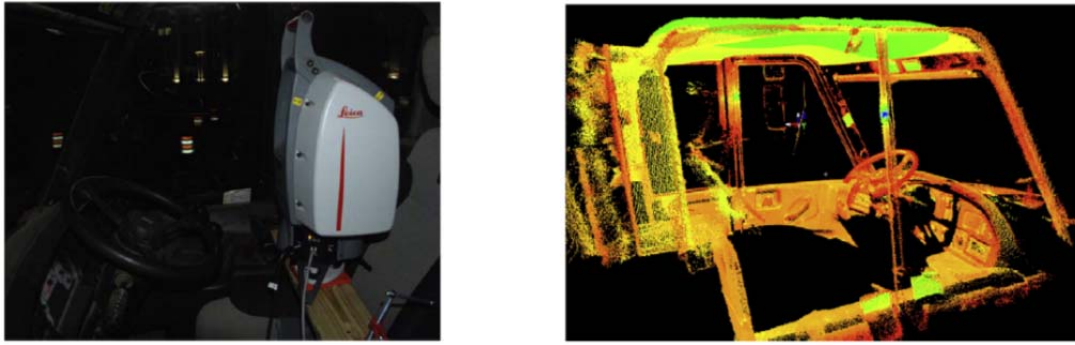


Figura 58: Ubicación del láser escáner y nube de puntos obtenida para la medición de áreas sin visión en maquinaria pesada (fuente: Teizer et al., 2010).

Para ello, con el fin de reducir la potencia computacional necesaria, el espacio de visión analizado en torno a la máquina, es dividido en cubos de tamaño seleccionado por el usuario. Aquellos cubos que contengan al menos un punto procedente del escaneado láser, deben ser considerados opacos. La base conceptual de estos algoritmos ya fue descrita por Elfes (1989), que subdividió el espacio en cuadrículas de ocupación tridimensionales formadas por unidades cúbicas (voxel o volume pixel) que eran consideradas ocupadas por masa o no (Figura 59). De esta manera se reduce significativamente el volumen de datos inicial.

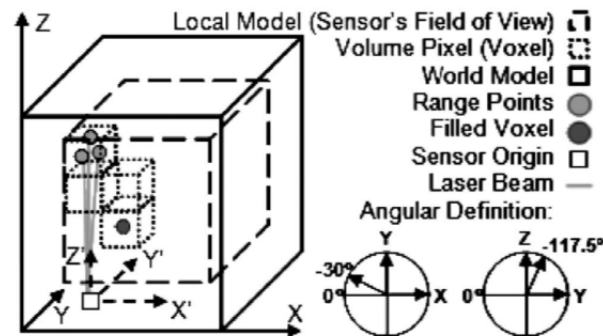


Figura 59: Modelo de cuadrículas de ocupación tridimensionales (Elfes, 1989)

Las áreas visibles son representadas en planos que seccionan una esfera, de dimensiones dadas por el usuario, creada a partir del punto de observación. Tomando como origen del sistema de referencia X, Y, Z este punto, los planos seleccionados pueden serlo para valores constantes de Z (planos XY), de X (planos YZ) y de Y (planos XZ). En la Figura 60 pueden observarse varias de estas representaciones en el plano XY para diferentes alturas Z predeterminadas.

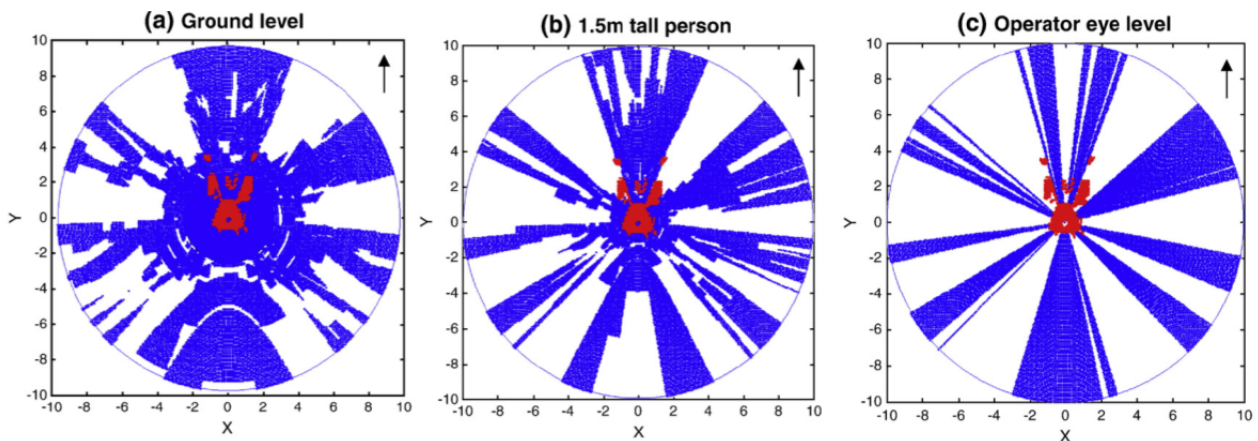


Figura 60: Planos de visión obtenidos para diferentes alturas hasta una distancia de 10 m desde el punto de observación: las áreas azules indican zonas sin visión, los puntos rojos corresponden a la cabina del vehículo (fuente: Teizer et al., 2010)

Con esta metodología, pueden localizarse las ubicaciones de trabajo más peligrosas en el entorno de la máquina (Figura 61).

El trabajo incluyó asimismo un experimento centrado en el cálculo de las áreas sin visión en el espacio en lugar de su representación en planos transversales. Para ello, y por motivos computacionales, se simplificó el volumen espacial considerado en una esfera de 10 m de radio entorno al observador, dividiéndola en un número máximo de cubos de 300x300x300 de dimensiones dadas por el usuario (y limitadas por este número máximo de cubos). No se incluye, sin embargo, una discusión sobre el efecto que en los resultados, puedan tener dichas dimensiones.

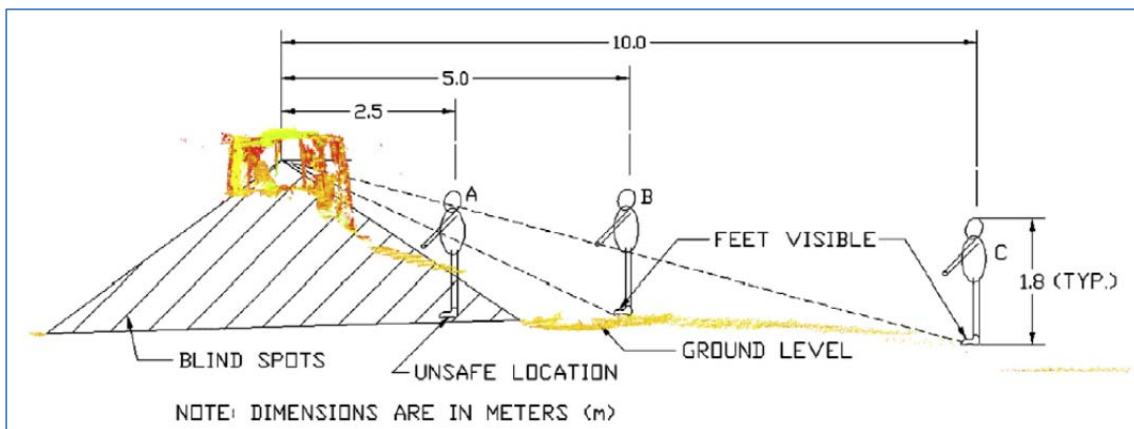


Figura 61: Visibilidad de un trabajador en diferentes ubicaciones (A, B y C) cerca de la máquina (fuente: Teizer et al., 2010)

2.5 LIMITACIONES DE LAS METODOLOGÍAS ACTUALES PARA LA ESTIMACIÓN DE VISIBILIDADES DISPONIBLES A PARTIR DE DATOS LIDAR

El estado del arte de esta investigación pone de manifiesto las diferencias entre las distancias de visibilidad establecidas en las diferentes guías de diseño para las principales maniobras de la conducción, así como las diferentes formas en que la visibilidad requerida por cada una de ellas debe medirse. Esta circunstancia es indicativa de la ausencia de un criterio único, lo que a su vez pone en cuestión el hecho de que la estimación de la visibilidad disponible deba contar con una gran precisión. Las diferencias entre criterios de seguridad de la maniobra pueden ser ya de por sí superiores a las diferencias en la visibilidad disponible obtenidas por distintas metodologías.

A pesar de ello, la mayoría de las metodologías actuales de cálculo de visibilidades están orientadas a la fase de diseño de la carretera, encontrándose también limitaciones en las metodologías desarrolladas para carreteras existentes basadas en datos LiDAR.

Estas metodologías emplean mayoritariamente los datos LiDAR para la obtención de un modelo digital de superficies a partir del cual se obtienen las visibilidades disponibles. Aunque sí se han desarrollado algunas metodologías en otros ámbitos, como por ejemplo en la evaluación de las zonas ciegas entorno a maquinaria pesada, no existen sin embargo metodologías basadas directamente en la nube de puntos para su uso en la obtención de visibilidades en carreteras.

Cuando los datos LiDAR se emplean en la obtención de una superficie tridimensional, se simplifican los casos de objetos que sobrevuelan la calzada ya que las superficies generadas contemplan un único atributo de altura por cada posición en el plano horizontal de referencia. Ninguna de las metodologías desarrolladas para visibilidades en carreteras contempla esta circunstancia.

Una situación similar se da con el uso de los datos LiDAR para la generación de secciones transversales de la carretera que son usadas en la estimación de la visibilidad disponible. Dichos perfiles deben ser de nuevo simplificados para reproducir el entorno envolvente de la nube de puntos y sin posibilidad de representar objetos que sobrevuelan la calzada.

Cuando se emplean datos LiDAR procedentes de escaneado móvil, las metodologías desarrolladas requieren la reducción de la nube de puntos original para poder abordar los cálculos con tiempos de proceso razonables; sin embargo, no se han evaluado las consecuencias en la precisión de resultados de dicha reducción.

La transformación a una superficie de elevación requiere la simplificación del objeto, lo que provoca que se pierda el detalle de los obstáculos ofrecido por la nube de puntos.

El uso de planos de visión (*plan_of_sight*, POS) empleado en alguna de estas metodologías no se adapta al caso más general de trazado en planta y alzado variado,

donde las distancias de visibilidad deben medirse de forma continua a lo largo de una línea de referencia, entre un observador y un obstáculo de posiciones y alturas predeterminadas.

Ninguna de las metodologías desarrolladas permite la visualización tridimensional conjunta de visuales y nube de puntos para interpretar correctamente las circunstancias de la obstrucción a la visión y validar el resultado obtenido para cada visual.

Algunas investigaciones recientes se han centrado en la comparación entre resultados de visibilidad disponible cuando se emplean modelos digitales del terreno y modelos digitales de superficies obtenidos a partir de datos LiDAR, sin embargo, en ausencia de metodologías que puedan emplear directamente la nube de puntos, no ha sido todavía posible cuantificar la pérdida de información que supone la generación de esos modelos con respecto al empleo directo de los datos LiDAR de partida. Este análisis permitiría ampliar las conclusiones acerca de las diferencias resultantes y de su influencia en los procesos ingenieriles actuales, su validez o sus limitaciones.

Tal y como ya se ha venido haciendo en algunas investigaciones basadas en el empleo de herramientas GIS, dado que la visibilidad requerida se encuentra siempre vinculada a la velocidad considerada para la maniobra, el análisis anterior debe considerar las velocidades de operación estimadas. De este modo se pondrían de manifiesto no sólo las diferencias entre los resultados de cada metodología sino también su importancia en relación con el comportamiento operacional estimado para la vía.

Puede concluirse por tanto, que existe la necesidad de seguir investigando sobre nuevas metodologías de estimación de visibilidades disponibles en carreteras en servicio a partir de datos LiDAR que sean capaces de considerar mejor la información sobre los obstáculos en ellos contenida, delimitando además la influencia de la densidad de estos datos en los resultados y comparando las diferencias obtenidas con otras metodologías ya existentes empleadas en la actualidad.

3 Metodología propuesta para la obtención de visibilidades a partir de datos LiDAR

3.1 INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha puesto de manifiesto en el Capítulo II correspondiente al Estado del Arte, no existe un equilibrio razonable entre la importancia que en fase de diseño se otorga a las visibilidades disponibles para el conductor en la realización de ciertas maniobras, y el control y seguimiento que de dichas visibilidades, y de sus variaciones con el paso del tiempo, se llevan a cabo una vez ejecutada la obra. Las dificultades para llevar a cabo este control sobre carreteras en servicio radican en la dificultad, el coste y el peligro que supone para los trabajadores la medición in situ de las visibilidades contempladas en las guías de diseño.

La aparición de nuevas tecnologías de adquisición masiva de datos del entorno basado en LiDAR, puede mostrarse útil en el control sistemático de distancias de visibilidad en carreteras, proporcionando una captura de datos rápida y sin peligro, con unos costes cada vez menores y sin afección al tráfico.

En este Capítulo se presenta una nueva metodología de obtención de visibilidades disponibles basada directamente en la nube de puntos LiDAR, capaz por tanto, de tomar en consideración todos los obstáculos presentes en el entorno de la carretera que puedan obstaculizar la visión del conductor.

Durante el desarrollo experimental de la tesis esta nueva metodología será analizada y sometida a comparación con otras metodologías existentes.

3.2 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA OBTENCIÓN DE VISIBILIDADES DISPONIBLES A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS LIDAR

3.2.1 Prisma visual (PV)

A las distancias habitualmente consideradas para las visibilidades de maniobras en carreteras, en la práctica ingenieril la sistemática de cálculo de visibilidades habitual parte de la hipótesis de que la percepción de un objeto por parte del conductor es asimilable a una línea visual recta trazada entre ambos que no colisione con ningún obstáculo presente en su trayectoria. Sin embargo, esta forma de proceder, útil en la intersección de la línea visual con un entorno formado por superficies por ejemplo, presenta serios inconvenientes cuando lo que se pretende es la consideración directa de una nube de puntos.

En este caso, dado que las superficies quedan representadas por un cierto número de puntos discretos sobre los que se ha producido la reflexión del haz láser, la consideración de una única línea recta visual requeriría para detectar el obstáculo que supone dicha superficie, que se produjera una coincidencia espacial exacta de alguno de los puntos que la forman con la línea. En caso contrario, la línea penetraría entre ellos provocando como resultado una falsa existencia de visión entre el observador y el obstáculo.

Para facilitar la identificación de dichas obstrucciones a la visión, el sistema desarrollado introduce ciertas modificaciones sobre la hipótesis tradicional, transformando el concepto de línea visual en uno nuevo en que la visión queda determinada, no por esta línea, sino por un prisma rectangular recto trazado a partir de ella.

Para ello, manteniendo el mismo sistema de referencia X,Y,Z en el que se encuentran geo-referenciados los puntos LiDAR, se considera únicamente una porción del espacio denominada *Prisma Visual (PV)* constituida por dos planos verticales paralelos ubicados a una distancia $a/2$ de la línea visual recta trazada entre el observador O y el objetivo T (Figura 62).

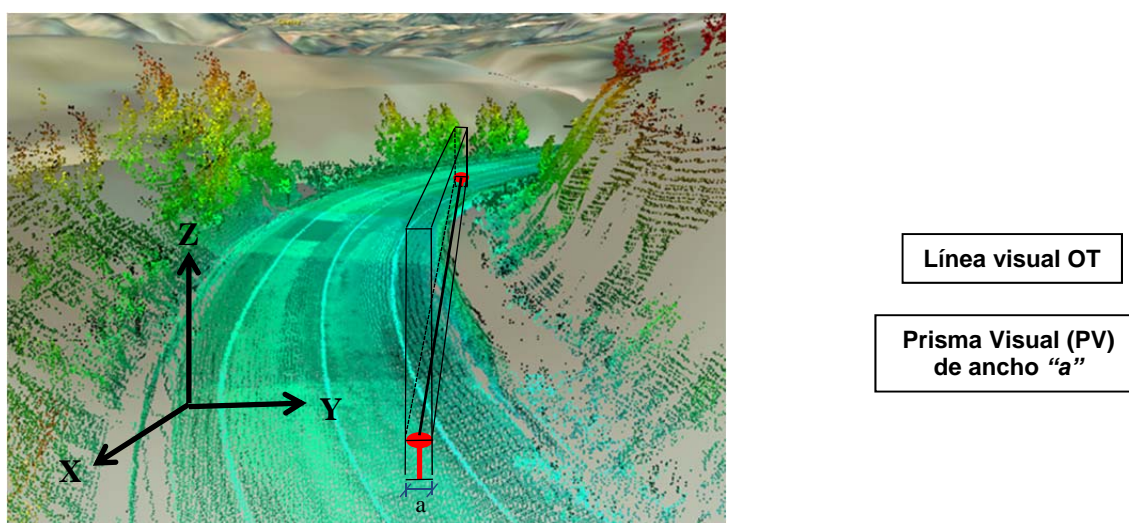


Figura 62: Prisma visual (PV) considerado entorno a la línea recta visual OT.

De este modo, de la nube de puntos original se considerarán tan solo aquellos puntos LiDAR $P_i (X_i, Y_i, Z_i)$ susceptibles de constituir un obstáculo a la visión para esta visual concreta, es decir, tan solo aquellos que se encuentren contenidos en el PV (Figura 63).

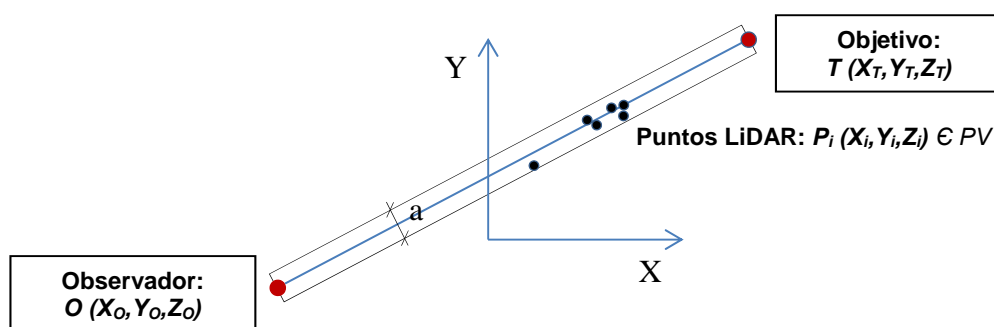


Figura 63: Proyección vertical sobre el plano XY de la porción de espacio considerada

Las ubicaciones puntuales del observador y del objetivo, dentro de la sección transversal, las alturas de ambos, así como la forma de realizar la medición de la distancia de visibilidad, vienen determinadas por las diferentes guías de diseño geométrico (AASHTO, 2011; M.Fomento, 1999).

3.2.2 Unidades prismáticas rectangulares (UPR)

Con el objetivo de reducir el tiempo computacional, tomando como referencia la metodología empleada por Elser (1989) basada en el Voxel (volumetric pixel) y Teizer (2010), esta región del espacio o prisma visual VP es subdividida a su vez en celdas o unidades prismáticas rectangulares (UPR) de dimensiones a y b predefinidas (Figura 64).

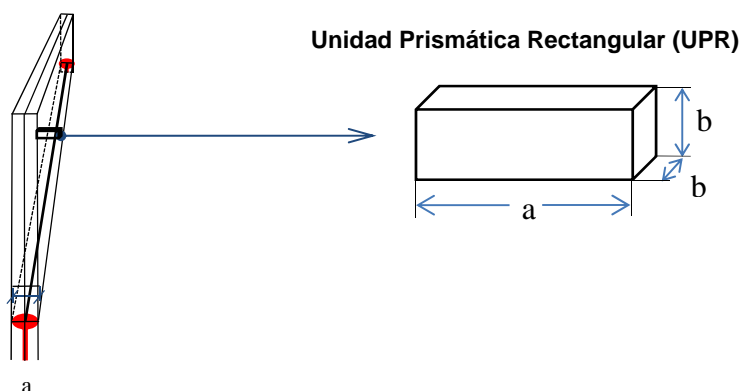


Figura 64: Unidad prismática rectangular (UPR) en que se divide el prisma visual VP

Cada UPR puede contener o no algún punto LiDAR en su interior de modo que en un análisis tridimensional, las UPR que contuvieran al menos un punto LiDAR serían consideradas opacas a la visión.

3.2.3 Transformación del problema tridimensional en un análisis bidimensional

Para simplificar los algoritmos de cálculo, el problema tridimensional de las visuales es transformado en un problema bidimensional con ciertas simplificaciones.

En primer lugar, los puntos LiDAR procedentes de la muestra original encontrados dentro del prisma visual son proyectados sobre el plano vertical que contiene al punto del observador y al punto objetivo. Los puntos quedarán ubicados dentro de una celda cuadrada de dimensión b resultado de intersectar la UPR en la que se encuentran con dicho plano vertical (Figura 65).

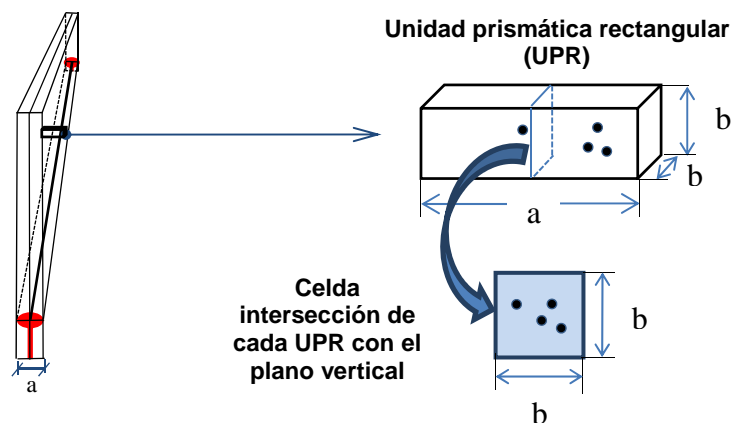


Figura 65: Proyección de los puntos LiDAR pertenecientes a la UPR sobre el plano vertical que contiene al punto observador y al punto objetivo

Sobre este plano vertical se sitúa un nuevo sistema de referencia local bidimensional $X'Y'$ en el que han de expresarse los puntos LiDAR proyectados. En este nuevo sistema, el origen de abscisas se ubica en coincidencia con la vertical del punto de observación O y el origen de ordenadas con la horizontal correspondiente al punto de menor cota de los contenidos en el PV. X'_i e Y'_i son las coordenadas del punto P'_i expresado en el nuevo sistema de referencia $X'Y'$. El plano $X'Y'$ es dividido en celdas cuadradas de dimensiones $b \times b$ resultantes de la intersección de cada UPR con dicho plano (Figura 66).

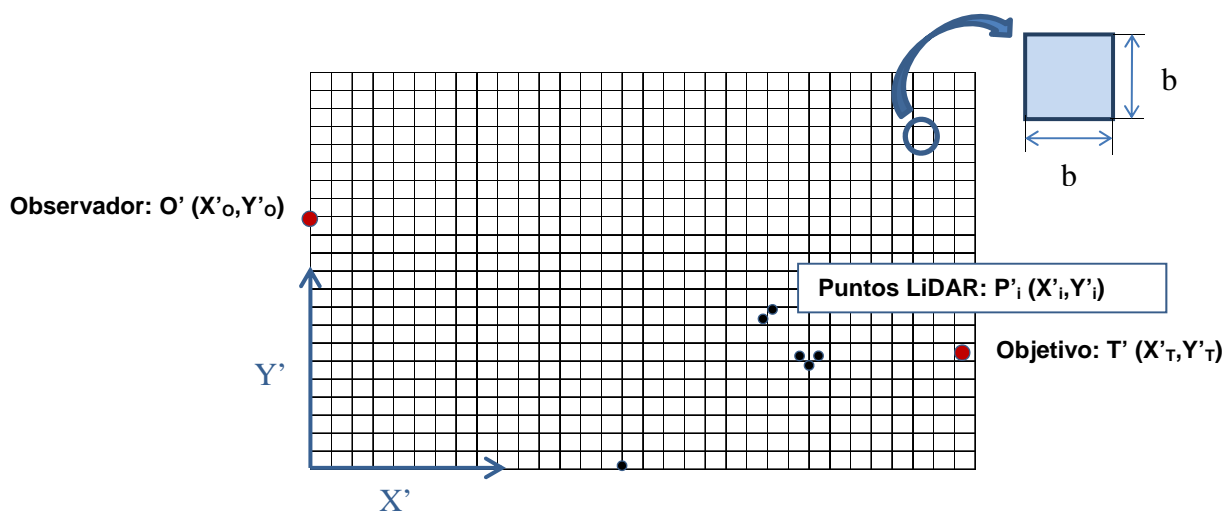


Figura 66: Sistema de referencia local bidimensional $X'Y'$

Cada uno de los puntos LiDAR proyectados sobre el plano vertical puede entonces ser expresado en el nuevo sistema de referencia de acuerdo con las Ecuaciones 26 y 27.

$$P_i (X_i, Y_i, Z_i) (3D) \rightarrow P'_i (X'_i, Y'_i) (2D)$$

$$\bullet \quad X'_i = (d_i \cdot \cos \alpha_i) \sim d_i = (\sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2}) \quad (26)$$

Siendo (Figura 67):

d_i = distancia (m) entre la proyección de los puntos $P_i (X_i, Y_i, Z_i)$ y $O_i (X_0, Y_0, Z_0)$ sobre el plano XY

α = ángulo (rad) formado por la recta que une los puntos proyectados sobre el plano XY, $O T$, y la recta $O P_i$

X_i = coordenada X del punto P_i en el sistema de referencia inicial

Y_i = coordenada Y del punto P_i en el sistema de referencia inicial

X_0 = coordenada X del punto O en el sistema de referencia inicial

Y_0 = coordenada Y del punto O en el sistema de referencia inicial

$$\bullet \quad Y'_i = (Z_i - \min Z_i) \quad (27)$$

Donde:

Z_i = coordenada Z del punto P_i en el sistema de referencia inicial

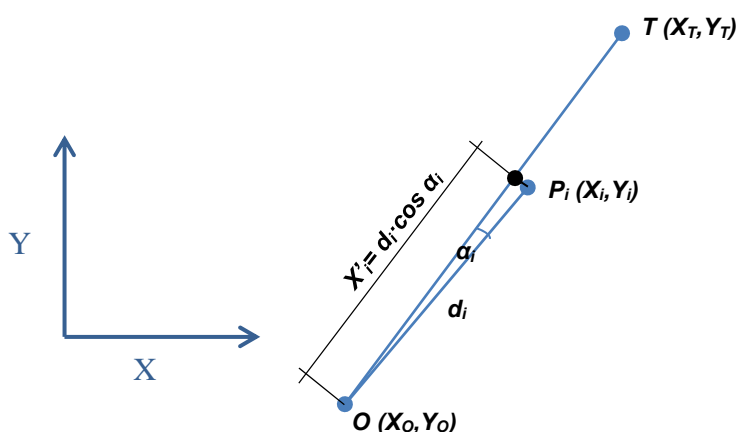


Figura 67: Coordenada X'_i del punto $P_i (X_i, Y_i, Z_i)$ en el sistema de referencia $X'Y'$

3.2.4 Determinación del alcance de la visual

De acuerdo con la hipótesis adoptada, cada celda cuadrada en la que queda dividido el plano $X'Y'$ que contenga al menos un punto de coordenadas $P'_i (X'_i, Y'_i)$ en su interior, será considerada como un obstáculo a la visión. La intersección de la línea visual con dicha celda, supondrá que a partir de este punto deja de existir visión para el conductor.

Para ello, tanto el punto del observador O como el punto objetivo T deben asimismo expresarse en el nuevo sistema de referencia $X'Y'$ de acuerdo con las

expresiones de las Ecuaciones 28 y 29 para el punto de observación y 30 y 31 para el punto objetivo.

$$O (X_0, Y_0, Z_0) \rightarrow O' (X'_0, Y'_0)$$

siendo

$$X'_0 = 0; \quad (28)$$

$$Y'_0 = (Z_0 - \min Z_i) \quad (29)$$

$$T (X_T, Y_T, Z_T) \rightarrow T' (X'_T, Y'_T)$$

siendo

$$X'_T = \sqrt{(X_T - X_0)^2 + (Y_T - Y_0)^2} \quad (30)$$

$$Y'_T = (Z_T - \min Z_i) \quad (31)$$

Donde:

X_T = coordenada X del punto T en el sistema de referencia inicial

Y_T = coordenada Y del punto T en el sistema de referencia inicial

X_0 = coordenada X del punto O en el sistema de referencia inicial

Y_0 = coordenada Y del punto O en el sistema de referencia inicial

Z_T = coordenada Z del punto T en el sistema de referencia inicial

Z_i = coordenada Z del punto P_i en el sistema de referencia inicial

Z_0 = coordenada Z del punto O en el sistema de referencia inicial

La recta visual trazada desde el observador O' hasta el objetivo T' puede además expresarse en su forma vectorial en el sistema de referencia $X'Y'$ tal y como expresan las Ecuaciones 32 y 33.

$$\overrightarrow{O'T'} = k \cdot \vec{u} \quad (32)$$

$$(X'_{vi}, Y'_{vi}) = (X'_0, Y'_0) + k \cdot \vec{u} = (0, Y'_0) + k \cdot \vec{u} \quad (33)$$

Donde:

\vec{u} = vector unitario de la recta visual $O'T'$ (Ecuación 34)

$$\vec{u} = \left(\frac{X'_R - X'_O}{|O'R'|}, \frac{Y'_R - Y'_O}{|O'R'|} \right) = \left(\frac{X'_R}{|O'R'|}, \frac{Y'_R - Y'_O}{|O'R'|} \right) \quad (34)$$

k = escalar ($\in \mathbb{R}$)

La celda a la que pertenece un punto de coordenadas x'_i e y'_i puede asimismo ser expresada en términos de posición matricial de modo que:

La fila y la columna pueden obtenerse a partir de las Ecuaciones 35 y 36.

$$Fila = \text{redondeo superior} \left(\frac{y'_i}{b} \right) \quad (35)$$

$$Columna = \text{redondeo superior} \left(\frac{x'_i}{b} \right) \quad (36)$$

Por los mismos motivos expuestos en el análisis tridimensional, en el plano $X'Y'$, la búsqueda del obstáculo no se lleva a cabo como una intersección del punto LiDAR con la recta visual, sino como una intersección de la recta visual con la primera celda encontrada en su recorrido que contenga al menos un punto LiDAR proyectado en su interior (celda opaca), esto es por la coincidencia de fila y columna entre alguno de los puntos pertenecientes a la recta visual y alguno de los puntos LiDAR proyectados sobre el plano $X'Y'$.

Para representar de una forma sencilla y fácilmente entendible esta circunstancia, se conviene en colorear en verde, la porción de línea visual que es visible para el observador y en rojo, la porción en que deja de serlo, determinadas ambas a partir de la primera celda opaca (Figura 68).

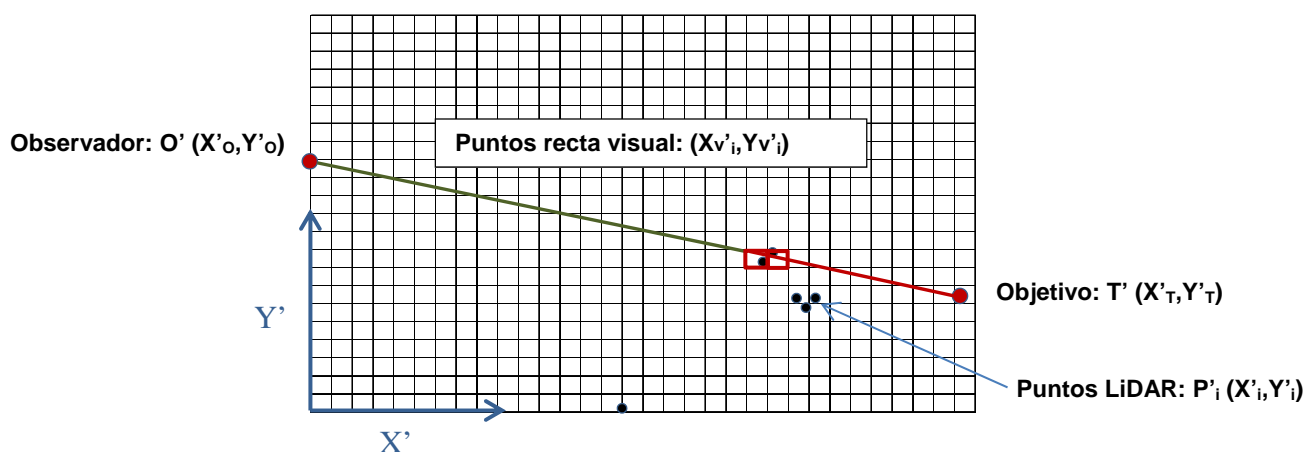


Figura 68: Representación de las porciones de recta visual visibles y no visibles expresada en el sistema de referencia local bidimensional $X'Y'$

3.2.5 Análisis de muestras de diferente densidad de puntos LiDAR

Dado que la visión de un objetivo desde un determinado observador depende de la existencia o no de algún punto LiDAR en las UPR atravesadas por la línea visual, el método desarrollado debe incluir un análisis de resultados para muestras de densidad variada.

Para ello, la muestra de puntos obtenida con el sistema operando a máxima frecuencia de escaneado será proporcionalmente reducida en muestras de densidad menor, de modo se pueda establecerse la combinación de dimensiones geométricas del PV y de la UPR por un lado, y de densidad de la muestra de puntos LiDAR por otro, que proporciona una correcta estimación de visibilidades.

3.2.6 Desarrollo de una aplicación informática de representación de visuales implementada en una herramienta de navegación tridimensional

Para facilitar la interpretación de resultados, se ha considerado necesario desarrollar una herramienta de visualización tridimensional que permita representar conjuntamente tanto las visuales generadas en el proceso, como también la nube de puntos LiDAR, de modo que además puedan superponerse también modelos digitales del terreno y ortofotografías digitales.

La herramienta de visualización se apoya en los desarrollos de Inproaudit y Dielmo 3D S.L. y está basada en el software libre World Wind de la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

La elección de este programa, ejecutable en ordenadores personales con sistema operativo Microsoft Windows, radica en su condición de software libre de código abierto basado en Java, ampliable y adaptable.

Sus prestaciones originales permiten la visualización del globo terráqueo con la superposición de imágenes de satélite procedentes de la NASA y fotografías aéreas procedentes del United States Geological Survey (USGS) sobre modelos tridimensionales de la tierra (Figura 69).



Figura 69: Capturas de pantalla del programa de visualización NASA World Wind

Estas prestaciones han sido ampliadas durante la redacción de esta tesis para permitir la carga de modelos digitales del terreno (MDT) y ortofotografías de mayor resolución, así como también de la nube de puntos LiDAR y de las visuales generadas con la nueva metodología propuesta en la investigación (Figuras 70 y 71).

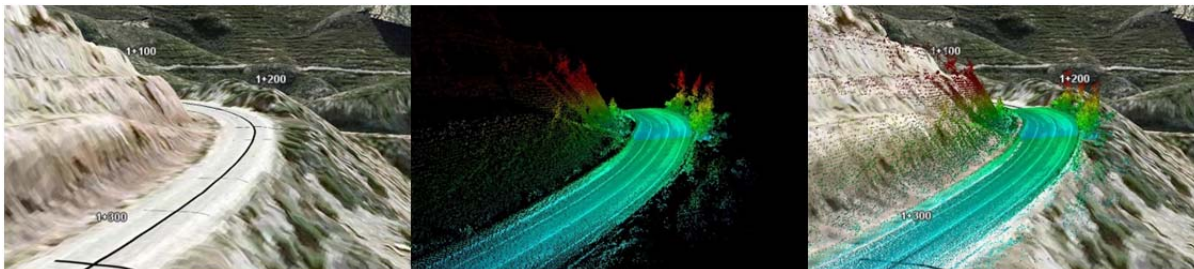


Figura 70: Visualización del MDT, la ortofotografía aérea y la nube de puntos LiDAR mediante el programa NASA World Wind ampliado

El objeto de este desarrollo para la visualización tridimensional no es otro que mejorar, de forma considerable, la capacidad de interpretación de los resultados de visibilidad obtenidos. Esta forma de proceder supone asimismo un salto cualitativo importante sobre las representaciones gráficas planas de resultados de visibilidad obtenidas mediante técnicas de Ray-tracing, como las mostradas en investigaciones anteriores (Teizer et al, 2010).

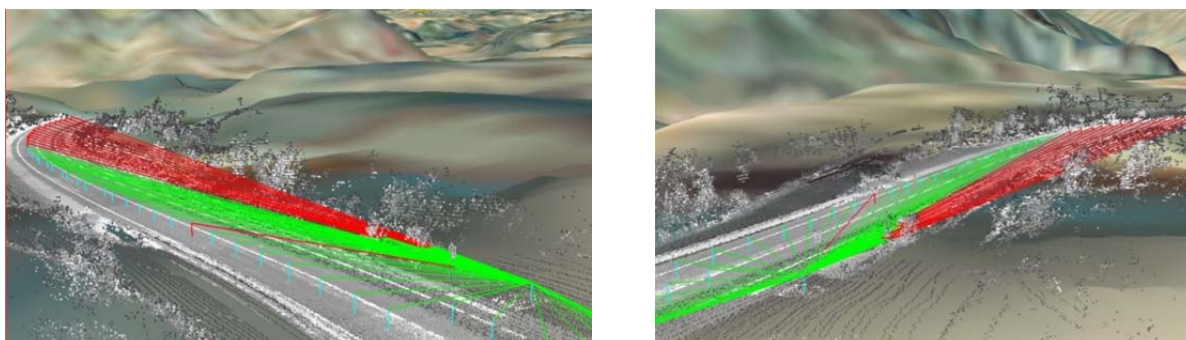


Figura 71: Visualización conjunta de las líneas visuales obtenidas con la nueva metodología, el MDT y la nube de puntos LiDAR mediante el programa NASA World Wind ampliado

4 Desarrollo experimental

4.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se describen cada una de las etapas que componen el desarrollo experimental del presente trabajo de investigación y que han permitido la consecución del objetivo principal: desarrollar, analizar y definir el ámbito y condiciones de aplicación de una nueva metodología de evaluación sistemática de visibilidades disponibles en carreteras existentes a partir de datos LiDAR Mobile.

Para ello, se ha procedido al análisis de los parámetros establecidos en la nueva metodología, al estudio comparativo de sus resultados de visibilidad con los obtenidos mediante métodos actualmente en uso en la práctica ingenieril basados en software específico de diseño y al análisis de la componente de tiempo de percepción y reacción asociada a la consideración de un prisma visual de determinada anchura en lugar de la tradicional línea visual.

4.2 TOMA DE DATOS LIDAR

Para llevar a cabo la fase experimental de la tesis se ha contado con datos LiDAR mobile que ha sido necesario tratar y procesar.

En fecha de redacción de la presente tesis doctoral, la cantidad y diversidad de muestras de datos se encuentran limitadas por el reducido número de sistemas que actualmente operan en el territorio nacional, presentando además, características muy diferentes entre ellos.

Las muestras empleadas en la investigación han sido facilitadas de forma altruista por las empresas Topcon Positioning Spain (a través de su delegación de Valencia), e Ingeniería Insitu S.L., con sede en Lugo. En los dos casos las muestras han sido obtenidas mediante sistemas LiDAR Mobile Topcon IPS-2 y Optech Lynx, respectivamente, y cuentan con las características de densidad y de entorno requeridas previamente por los objetivos de la investigación.

No obstante, futuras investigaciones deben ser llevadas a cabo para ampliar el tamaño, características y casos de la muestra de datos de modo que puedan ser ampliadas las conclusiones de la presente investigación.

En este epígrafe se describen tanto las características de los tramos de carretera analizados, como la metodología seguida en cada caso para la toma de los datos LiDAR.

4.2.1 Características de los tramos de carretera seleccionados para la investigación

Para la investigación se ha contado con datos LiDAR mobile obtenidos en dos tramos de carretera convencional de un carril por sentido. Por su mayor interés para la investigación, ambos cuentan con una geometría en planta variada, así como de un

entorno con presencia de múltiples tipos de obstáculos de diferente naturaleza (Figuras 72 y 73).

Estos tramos han sido seleccionados además, de manera que contarán con alineaciones curvas de velocidades específicas variables y despejes de amplio rango.

Los obstáculos a la visibilidad presentes son debidos tanto a la propia geometría en planta y alzado de la carretera, como a obstáculos anexos. De esta manera se cuenta con una casuística que aunque limitada, resulta apta para su análisis y estudio comparativo.

Carretera convencional CP-29-25 (Lugo)

Longitud del tramo analizado: 3.050 m

Radio mínimo: 30 m

Radio máximo: 10.710 m

Pendiente longitudinal mínima: 0,1%

Pendiente longitudinal máxima: 2,9%

Kv mínimo acuerdo cóncavo: 2.317 m

Kv mínimo acuerdo convexo: 3.207 m

Velocidad de circulación: variable 30-70 km/h

Equipo LiDAR Mobile: Optech Lynx



Figura 72: Localización y características carretera convencional CP-29-25 (equipo Optech)

Carretera convencional CV-35 entre Losa del Obispo y Calles (Valencia) pp.kk. 57+040 y 60+290

Longitud del tramo analizado: 3.250 m
Radio mínimo: 79,19 m
Radio máximo: 420 m
Pendiente longitudinal mínima: 0,02%
Pendiente longitudinal máxima: 5,44%
Kv mínimo acuerdo cóncavo: 1.397 m
Kv mínimo acuerdo convexo: 1.505 m
Velocidad de circulación: variable 40-70 km/h
Equipo LiDAR Mobile: Topcon IPS-2

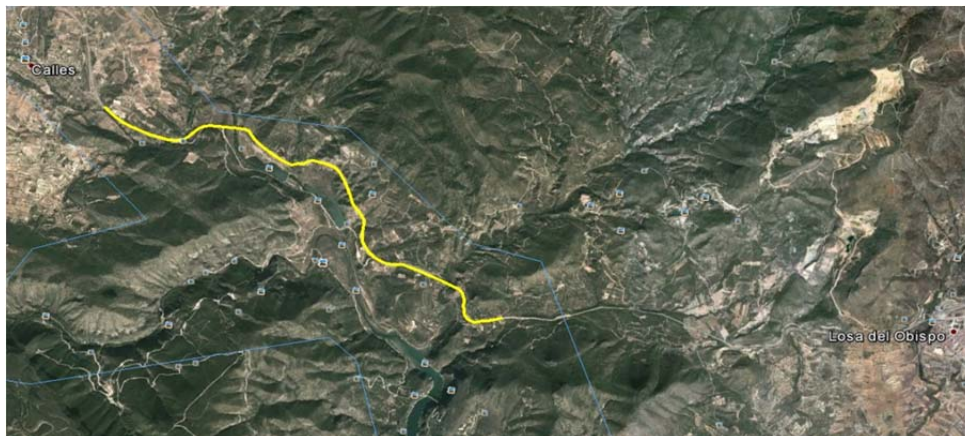
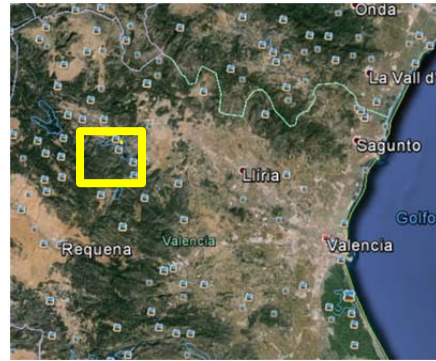


Figura 73: Localización y características carretera convencional CV-35 (equipo Topcon)

Debido a las diferentes características de los equipos LiDAR mobile empleados en ambos casos, los tramos seleccionados han constituido la muestra de análisis de dos fases diferenciadas de la investigación.

El tramo de carretera CP-29-25 (Lugo) disponible con equipo Optech, que cuenta con mayor precisión y frecuencia de escaneado, ha sido empleado en el análisis de resultados de visibilidad con densidades de la nube de puntos variable, mientras que el tramo de carretera CV-35 (Valencia), escaneado con el equipo Topcon, que se considera cota inferior en la densidad de puntos de los actuales sistemas mobile, ha sido empleado en el estudio comparativo de visibilidades obtenidas mediante la generación de modelos

digitales del terreno y de superficie, mediante perfiles teóricos de diseño adaptados a las circunstancias reales de la vía y mediante la nueva metodología propuesta.

4.2.2 Características de los equipos LiDAR Mobile empleados en la toma de datos

Carretera CP-29-25 (Lugo), OPTECH LYNX:

El equipo Optech Lynx (Figura 74) constituye el sistema de mayor frecuencia y precisión de los dos empleados en la presente investigación. Por sus características, este equipo ha proporcionado los datos LiDAR necesarios para el análisis de los parámetros propuestos en la nueva metodología teniendo en cuenta diferentes densidades de la nube de puntos.



Figura 74: Vehículo dotado con el equipo OPTECH-Lynx

Este equipo cuenta con un sistema Applanix POS-LV520 GNSS/INS para georeferenciación de los puntos, posicionamiento del vehículo y sincronización de tiempos. Sus especificaciones técnicas, de acuerdo con la información proporcionada por el fabricante, se resumen en la Tabla 6 para diferentes coberturas GPS (total y ausencia de señal de 60 segundos) para los casos de GPS diferencial (PP), asistencia cinemática (Inertially-Aided Real-Time Kinematic, IARTK) y postproceso (DGPS):

Tabla 6: Errores de posicionamiento del sistema Applanix POS-LV520 (equipo Optech Lynx)

Error de posicionamiento	PP	IARTK	DGPS
X,Y (m)	0,020/0,100	0,035/0,300	0,300/0,420
Z (m)	0,050/0,070	0,050/0,100	0,500/0,530

Las distancias que alimentan al sistema de posicionamiento son obtenidas mediante dos láser escáner de alta frecuencia cuyas características se resumen asimismo en la Tabla 7.

Tabla 7: Características de los láser escáner del equipo Optech Lynx (fuente: Optech)

Distancia máxima	200 m
Precisión	10 mm
Frecuencia	75-500 kHz
Número de ecos	4
Campo de visión	360º
Clase de Laser	Clase 1

Carretera convencional CV-35 entre Losa del Obispo y Calles (Valencia), TOPCON IPS-2

El equipo Topcon IPS-2 (Figura 75) constituye uno de los sistemas de acceso a la gama comercial de equipos LiDAR mobile o mobile mapping existentes en el mercado. Sus características, más generalistas, han sido escogidas para el estudio comparativo de obtención de visibilidades a partir de la nueva metodología propuesta, modelo digital del terreno y modelo digital de superficies.



Figura 75: Vehículo dotado con el equipo IPS-2

Tabla 8: Error de posicionamiento del sistema IPS-2 Topcon (fuente: Topcon)

GNSS Outage Duration (s)	Point Error RMS (m)					
	5 m		10 m		20 m	
	2D	H	2D	H	2D	H
0	0,040	0,035	0,055	0,040	0,105	0,060
15	0,045	0,035	0,060	0,040	0,110	0,060
30	0,065	0,040	0,080	0,045	0,130	0,065

Este equipo cuenta con odómetro, una unidad de medición inercial (IMU) Honeywell HG1700-AG58 de 100 Hz, sistema GNSS de 20 Hz formado por antena GPS Topcon PG-A1 y tres láser escáner SICK LMS-291 de 40 kHz (13,3 kHz*3) así como unidad IPS-2 para recepción de datos, sincronización y cálculo de posición.

Los datos de precisión aportados por el fabricante en función de la distancia y de la cobertura de señal GPS se resumen en la Tabla 8, variando entre 30 y 50 mm para la posición absoluta en función de la distancia del punto medido.

4.2.3 Datos LiDAR aéreo. Proyecto PNOA-IGN

Para la obtención de los modelos digitales del terreno (MDT) y para complementar los datos procedentes del equipo mobile requeridos para la elaboración de los modelos digitales de superficies (MDS), se han empleado los datos LiDAR del Instituto Geográfico Nacional (IGN) incluidos dentro del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

Estos datos fueron obtenidos mediante un sistema láser escáner montado sobre un avión (LiDAR aéreo) complementado con las correspondientes unidades de medición inercial y de posicionamiento global por satélite para el posicionamiento de puntos. El sistema geodésico de referencia empleado es ETRS89 para los tramos de carretera analizados.

De acuerdo con la información del PNOA, las características obtenidas para los puntos del vuelo LiDAR quedan resumidas en la Tabla 9.

Tabla 9: Características técnicas del vuelo LiDAR del PNOA (fuente: IGN)

	Densidad nominal (pts/m ²)	Distancia nominal entre puntos (m)	Precisión altimétrica de la nube de puntos
LiDAR PNOA	0,5	1,4	RMSE z ≤ 20 cm

Los ficheros empleados se encuentran en formato *.las* que es un tipo de archivo binario desarrollado por la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) que mantiene toda la información procedente del sistema LiDAR. Este tipo de archivos permite el intercambio entre diferentes aplicaciones y software y supone una ventaja frente al uso de archivos ASCII, de mayor tamaño y que pierden gran parte de la información propia del LiDAR.

En los ficheros *.las* se mantiene la información correspondiente a los diferentes rebotes del haz láser, lo que permite la clasificación de puntos de acuerdo con un sistema estandarizado. Esta información es la base para la generación de modelos digitales del terreno y modelos digitales de superficies.

4.3 TRATAMIENTO DE DATOS LIDAR

4.3.1 Obtención de un modelo digital del terreno (MDT) a partir de datos LiDAR aéreo

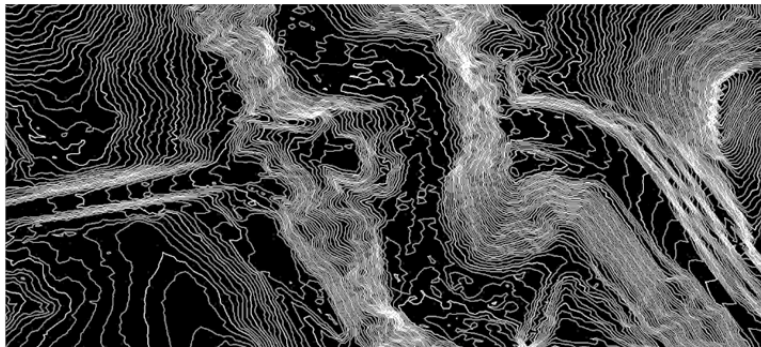
Los ficheros *.las* proporcionados por el IGN contienen una clasificación previa de los datos en función de la superficie a la que pertenece el punto atendiendo al orden de rebote del haz láser (eco). El código de clasificación definido para este tipo de archivo como "ground", de acuerdo con lo establecido por la ASPRS para archivos *.las* 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4, aglutina los puntos LiDAR pertenecientes al terreno a partir de los cuáles es posible crear un MDT. Los puntos se encuentran en el sistema de referencia ETRS89 H30.

El IGN cuenta con modelos digitales del terreno de 5 m de resolución creados a partir de los datos LiDAR como producto del proyecto PNOA (MDT05); sin embargo, para el desarrollo de esta investigación y a partir de la misma información LiDAR, se han elaborado modelos digitales específicos de 1 m de resolución por los siguientes motivos:

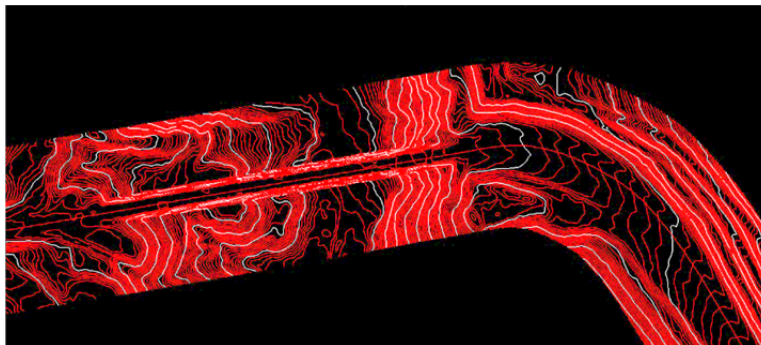
- La densidad de puntos del proyecto PNOA en el área analizada (0,5 pts/m²) permite una mejor definición del terreno con una resolución superior a la proporcionada por el IGN en sus modelos MDT05.
- Recientes investigaciones (Castro et al. 2015b) ponen de manifiesto la importancia de la resolución de los modelos digitales en los resultados de

visibilidad cuando se comparan resoluciones de 5,0 m y de 1,0 m mejorando en este último caso.

- Los MDT proporcionados por el IGN no incluyen los puentes al tratarse de estructuras asentadas sobre el terreno que no forman parte de él, sin embargo, esta información resulta esencial en la caracterización geométrica y en el análisis de visibilidades de la carretera (Figura 76).
- Los modelos de 1 m de resolución serán los previsiblemente disponibles en un futuro cercano a través de los propios institutos geográficos o cartográficos, por lo que su uso permitirá que las conclusiones obtenidas de esta investigación dispongan de una mayor proyección temporal.



a)



b)

Figura 76: MDT del mismo tramo de carretera CV-35: a) curvado del MDT05 del IGN (5 m de resolución, sin estructuras) y b) curvado del MDT generado para esta investigación (1 m de resolución, con estructuras)

Para la elaboración de este MDT se han seguido las siguientes fases:

1. Clasificación automática de puntos basada en criterios morfológicos a partir de la información de los diversos ecos presentes en los ficheros *.las* del PNOA-IGN.
2. Revisión de la clasificación mediante visualización tridimensional de la nube de puntos y análisis simultáneo de ortofotografías aéreas. Corrección manual de puntos incorrectamente clasificados.

3. Rasterización de los datos y generación del MDT con asignación del punto de menor cota de los presentes en la celda e interpolación con celdas contiguas en caso de vacío de datos. El tamaño de celda empleado es de 1mx1m. El método de interpolación se aplica exclusivamente a las celdas vacías, manteniendo el valor registrado por el sensor LiDAR en cada celda (valor de mínima cota).
4. Visualización tridimensional y revisión del MDT generado (Figura 77).
5. Curvado con líneas de nivel generadas con equidistancia de 0,50 m apto para su uso en aplicaciones comerciales de diseño de carreteras.

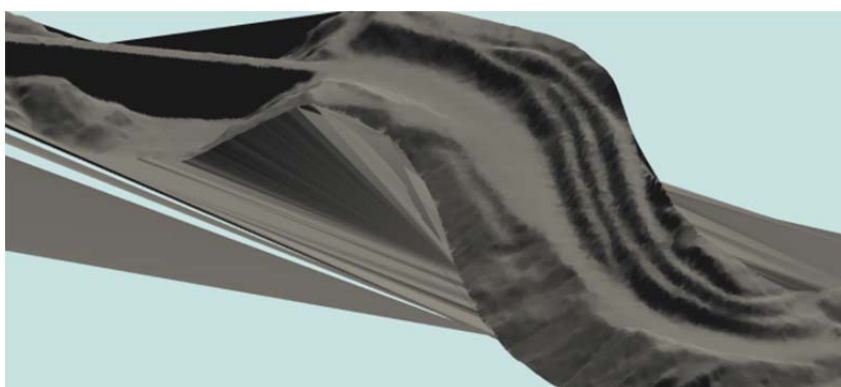


Figura 77: Visualización tridimensional del MDT obtenido a partir de datos LiDAR aéreo (carretera CV-35 con estructuras)

4.3.2 Obtención de un modelo digital de superficies (MDS) a partir de datos LiDAR aéreo y LiDAR mobile

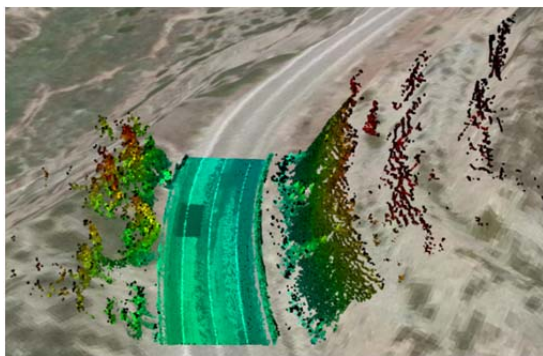
El modelo digital de superficies (MDS) empleado en la investigación ha sido generado por combinación de los datos presentes tanto en el escaneado LiDAR mobile como en el proyecto PNOA a partir de los ficheros *.las* del vuelo LiDAR.

A efectos del análisis de visibilidades posterior, dicha combinación permite reproducir las alturas de los puntos presentes en el entorno inmediato de la carretera con el detalle de adquisición propio de los equipos LiDAR mobile, completando aquellas zonas en las que se producen sombras o vacíos en el escaneado móvil terrestre con datos LiDAR aéreo complementarios. El modelo así generado corresponde al tipo de los descritos como 2,5D en el estado del arte de esta investigación (apartado 2.3.4).

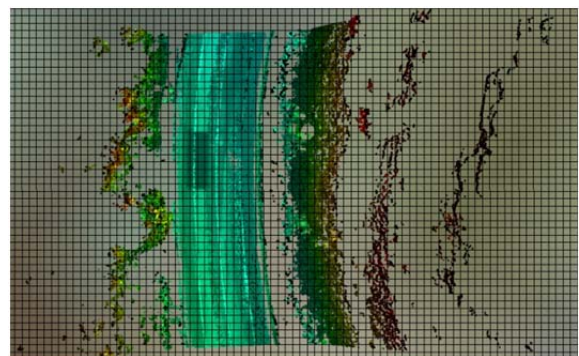
Al igual que en la generación de un MDT, los datos de partida de ambas fuentes se encuentran también en el sistema de referencia ETRS89-UTM H30.

El procedimiento seguido para la obtención del MDS combinando datos LiDAR aéreo y mobile consta de las siguientes fases:

1. Clasificación de los datos LiDAR aéreo atendiendo al primer eco generado en el escaneado, de modo que se identifiquen los puntos de mayor altura de los obtenidos, lo que permite mantener en el análisis obstáculos potenciales a la visión aunque no formen parte del terreno.
2. Revisión de la clasificación mediante visualización tridimensional de la nube de puntos. Corrección manual de puntos incorrectamente clasificados.
3. Para representar el mayor detalle que proporcionan unos datos de partida Lidar mobile, la resolución se ha ampliado en este caso hasta los 0,10 m, por lo que se rasteriza el área de estudio en celdas de 0,10mx0,10m y se asignan los puntos LiDAR a cada una de ellas dando prioridad a los datos LiDAR mobile sobre los datos LiDAR aéreo, de modo que si en una celda coexisten ambos, los datos Lidar aéreo son eliminados (Figura 78). De esta manera quedan representados con mayor precisión sistemas de contención, muretes o vegetación próxima a la carretera.
4. Generación del MDS con asignación del punto de mayor cota de los presentes en la celda e interpolación con celdas contiguas en caso de que no existan datos procedentes ni del escaneado aéreo ni del escaneado mobile.
5. Visualización tridimensional y revisión del MDS generado (Figura 79).
6. Curvado con líneas de nivel con equidistancia 0,10 m. Esta equidistancia es seleccionada en relación a la precisión de los puntos LiDAR mobile de modo que se puedan reproducir obstáculos de pequeña altura tales como barreras, pretilos o vegetación de bajo porte.



a)



b)

Figura 78: a) Vista tridimensional de datos LiDAR mobile, b) Rasterización en celdas de 1m x 1m

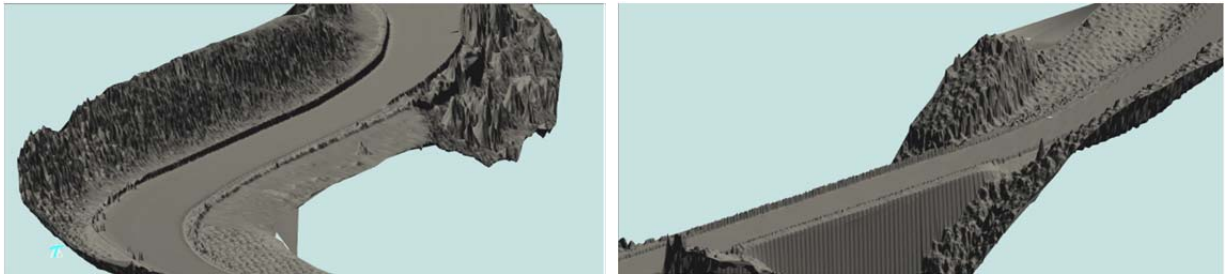


Figura 79: Visualización tridimensional de MDS obtenido a partir de datos LiDAR aéreo y LiDAR mobile (carretera CV-35)

Debido a la forma en que se obtienen los datos procedentes de un escaneo móvil, la presencia de tráfico en la carretera puede introducir puntos que pertenecen a los vehículos que circulan en sentido contrario o que adelantan al vehículo de toma de datos. Si no se produce una revisión y eliminación manual de estos puntos, la generación del MDS reproduce al tráfico presente en la toma de datos como obstáculos sobre la calzada (Figura 80 y 81).

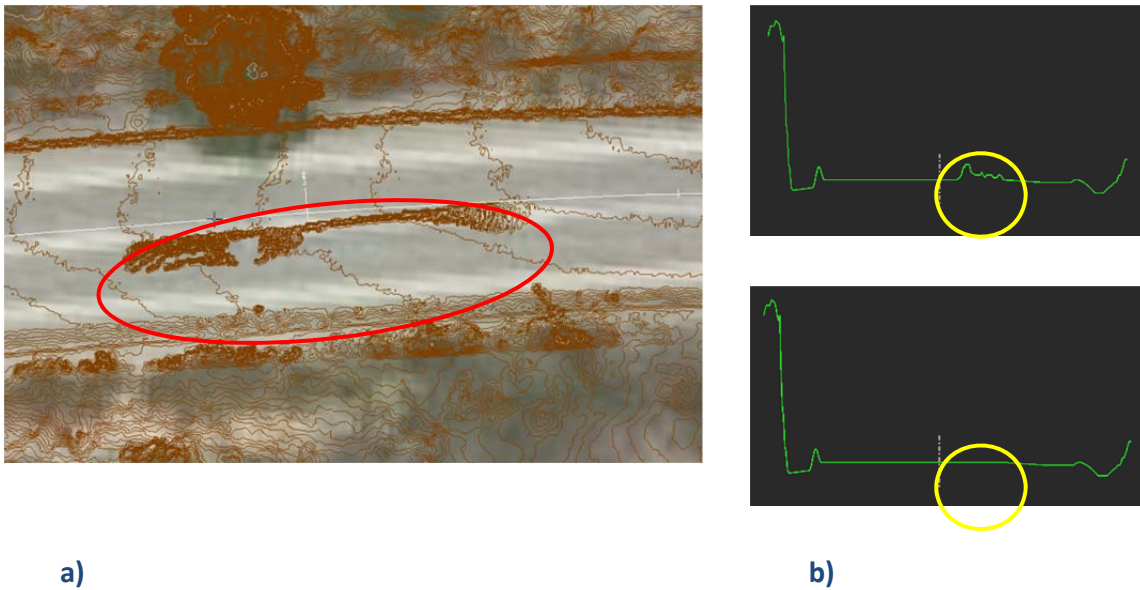
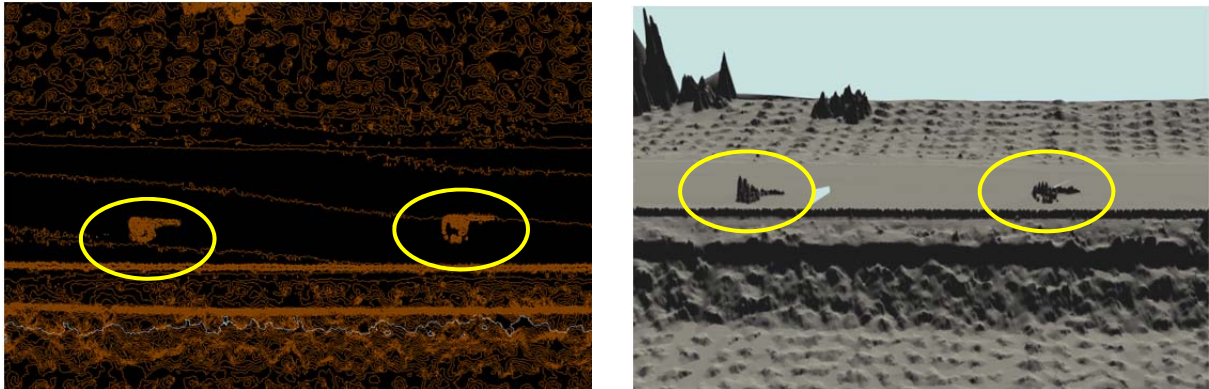


Figura 80: a) Resultado de un MDS curvado sin eliminación del “ruido” generado por el tráfico durante el escaneo. b) Perfiles transversales antes y después de la eliminación del “ruido”



a)

b)

Figura 81: Curvado (a) y visualización tridimensional (b) de un MDS sin eliminación del “ruido” generado por el tráfico durante el escaneado.

4.3.3 Obtención de perfiles teóricos de proyecto

Durante la fase de proyecto se adoptan ciertas simplificaciones cuyo efecto sobre los resultados de visibilidad se ha sometido también a análisis. Así, por ejemplo, con el empleo de software específico de diseño geométrico es práctica habitual la consideración de perfiles transversales cada 20 m en las comprobaciones de visibilidad, así como taludes de excavación y relleno formados por planos ideales, lo que da lugar a representaciones perfectamente lineales en los perfiles transversales. Adicionalmente, cuando el software lo permite, los muros o los sistemas de contención son introducidos en el modelo como líneas rectas situadas a una distancia determinada del eje de referencia como cortes verticales del terreno natural o con una cierta altura sobre la rasante.

En esta fase de proyecto, la base sobre la que se diseña es un modelo digital del terreno (MDT) que puede tener diversas procedencias.

Aún conscientes de las diferencias entre lo proyectado y lo realmente construido que pueden acompañar a toda obra de carretera, el objetivo de este análisis es reproducir los resultados de visibilidad disponible que se habrían obtenido en la fase de diseño y compararlos con los que se obtendrían por aplicación de la nueva metodología de prismas visuales. De este modo se pretende contrastar una de las hipótesis inicialmente planteadas que supone que, en fase de proyecto, puede sobreestimarse la visibilidad realmente disponible en fase de explotación.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, sobre la base del MDT generado a partir de datos LiDAR aéreo, empleando un software comercial de diseño y aproximando cada uno de los perfiles a la realidad observada, se ha procedido a obtener los resultados de visibilidad disponible. Dicho software permite la incorporación de muros y barreras como líneas verticales simplificadas pero no la vegetación circundante.

Para ello, dado que se asume que no ha habido cambios desde el proyecto hasta la ejecución, el ajuste en alzado y en sección transversal se ha realizado de modo que con el perfil transversal teórico, se reproduzca la forma del terreno resultante cuando se consideran los datos que mejor se ajustan a la realidad ejecutada (datos LiDAR mobile). Esta es una forma de considerar que el proyecto se ha ejecutado sin modificaciones pero con las pequeñas variaciones e imperfecciones propias del proceso constructivo.

En la Figura 82 puede observarse uno de los perfiles así obtenidos. En la imagen los taludes y cunetas practicados sobre el MDT (línea blanca) se aproximan al perfil resultante de la lectura LiDAR mobile (línea verde). De esta manera se supone que la carretera se ha ejecutado como establecen los perfiles de proyecto, aunque con las irregularidades propias de la construcción.

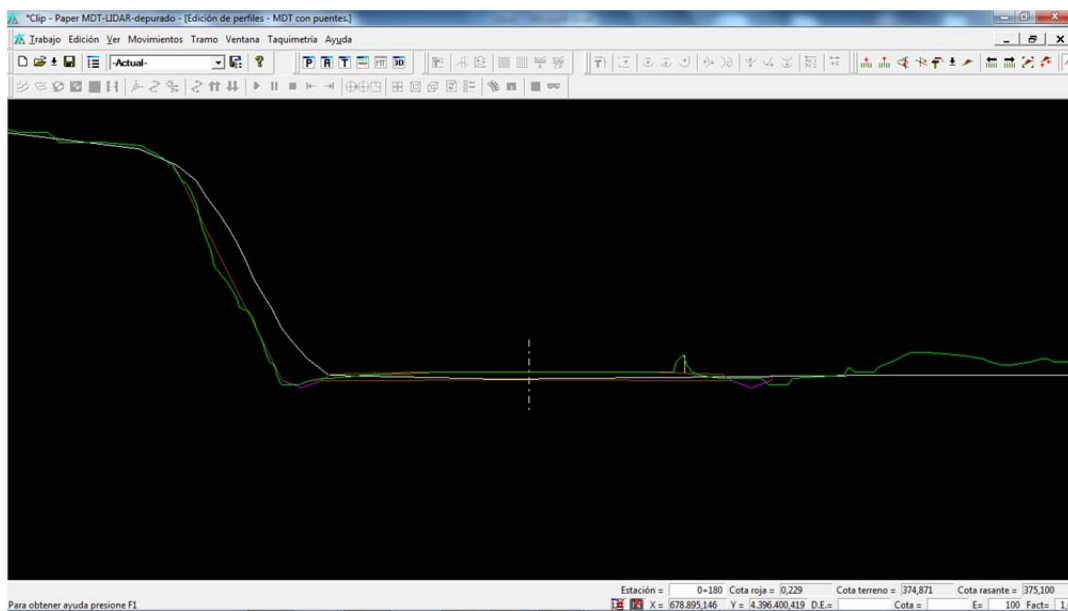


Figura 82: Perfil teórico de proyecto (carretera CV-35)

4.3.4 Generación de nubes de puntos LiDAR de diferente densidad

La densidad de los datos LiDAR mobile obtenidos tiene influencia en los resultados de visibilidad por lo que resulta necesario analizar dicha influencia mediante la generación de muestras con diferente número de datos a partir de una de densidad máxima que es la muestra original.

Para ello, debe tenerse en cuenta que en buenas condiciones meteorológicas los sistemas de captura de datos LiDAR mobile generarán una nube de puntos de densidad dependiente de los siguientes parámetros:

- frecuencia de escaneado
- distancia al sistema y características de los objetos escaneados

- número de pulsos emitidos al espacio sin retorno al sistema
- velocidad de circulación del vehículo sensorizado

De ellos, la frecuencia de escaneado puede establecerse a priori, sin embargo, en una toma de datos llevada a cabo en carretera convencional, de geometría variable y, con posible presencia de tráfico, resultarán variables tanto la distancia de los objetos al sistema y sus características, como también la velocidad de circulación del vehículo en cada punto del trazado. Estas circunstancias impiden que el número de puntos por unidad de superficie sea un parámetro controlable del escaneado, ni siquiera a nivel de calzada.

En la presente investigación, una de las muestras disponible para su análisis, consistente en un tramo de carretera ubicada en la provincia de Lugo, ha sido sometida a un escaneado láser con frecuencia fijada en el valor máximo establecido por el fabricante, lo que según sus especificaciones permite la localización de un número máximo de 1.000.000 de puntos en cada segundo. El sistema se ha montado sobre un vehículo que ha circulado a velocidades variables de entre 30 y 70 km/h, pero del que es desconocida la velocidad practicada en cada punto concreto del trazado.

Con estas condiciones de partida, la obtención de las nubes de puntos de diferente densidad se ha llevado a cabo mediante un post-proceso, en el que se ha reducido de forma proporcional el número de puntos contenidos en los ficheros *.las* originales (Figura 83), obteniendo las siguientes 4 muestras:

- D1: muestra original
- D2: muestra que contiene un 50% de los datos originales, eliminando del fichero original D1, uno de cada dos datos
- D3: muestra que contiene un 25% de los datos originales, eliminando uno de cada dos datos del conjunto D2
- D4: muestra que contiene un 12,5% de los datos originales, eliminando uno de cada dos datos del conjunto D3

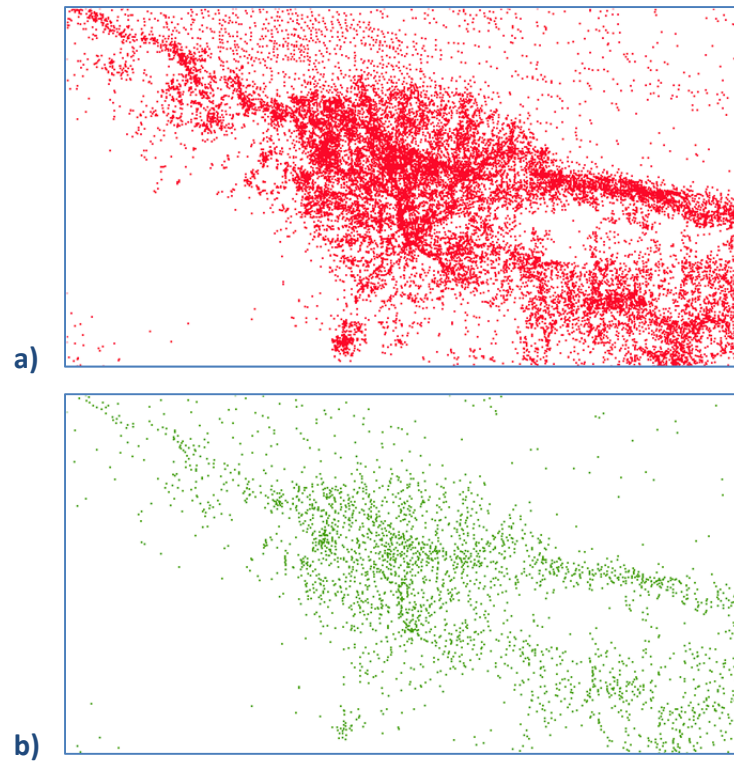


Figura 83: Ejemplo de nube de puntos original correspondiente a la mayor densidad D1 (a) y la correspondiente a la densidad D4 (b). Carretera CP-29-25 (Lugo)

En caso de que hubiera podido mantenerse exactamente la misma velocidad de circulación en cada punto del trazado, esta forma de proceder equivaldría a muestras obtenidas con unas frecuencias de escaneado de 1.000.000, 500.000, 250.000 y 125.000 puntos por segundo respectivamente. Sin embargo, dado que esta premisa no ha constituido la base del experimento, esta observación debe considerarse tan solo como orientativa sin que pueda asignarse en ningún caso a los resultados obtenidos. Estas frecuencias de escaneado son representativas del estado actual de la tecnología, no siendo esperable el uso de sistemas de menor frecuencia que los considerados en un futuro inmediato dada la tendencia y evolución de los sistemas LiDAR mobile.

Por su parte, la otra muestra empleada en la investigación referente a un tramo de la carretera CV-35 ubicada en la provincia de Valencia, constituye la de menor densidad de las analizadas y se corresponde con una frecuencia de escaneado de 40.000 puntos por segundo, lo que resulta ligeramente inferior a la tercera parte de la frecuencia equivalente a la muestra D4. Esta frecuencia se considera cota inferior de los actuales equipos LiDAR mobile comerciales.

4.4 GEOMETRÍA DE LAS CARRETERAS SOMETIDAS A ESTUDIO

La geometría de las carreteras analizadas ha sido necesaria tanto para el estudio comparativo de visibilidades obtenidas mediante la nueva metodología y el software de diseño aplicado a un MDT y a un MDS en el caso de la carretera CV-35, como para el análisis de la influencia de la densidad de la nube de puntos en los resultados obtenidos con la metodología de prismas visuales llevado a cabo en la CP-29-25.

La restitución del eje en planta se ha llevado a cabo mediante el ajuste del eje a la línea central de separación de sentidos visible en la ortofoto aérea de máxima actualidad incluida en el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea del IGN (PNOA), mientras que el ajuste en alzado ha sido llevado a cabo mediante ajuste a la lectura de terreno procedente del MDT y MDS. El sistema de referencia empleado es ETRS89-H30 para la CV-35 y ETRS89-H29 para la CP-29-25.

Para ello, a pesar de la existencia de metodologías alternativas para la obtención de la geometría en planta, tales como el ajuste al perfil de curvaturas, el uso de B-splines cúbicas o el ajuste al diagrama de azimuts, debido a la reducida longitud y limitada complejidad de los tramos de carretera analizados, la restitución llevada a cabo en esta investigación se ha realizado de forma manual con la ayuda del propio software de diseño. Esta forma de proceder es todavía la más habitual en la práctica ingenieril, permitiendo además, un mayor control sobre la geometría resultante.

El software de diseño geométrico empleado para ello ha sido el CLIP Versión 1.27.54.265.0g-0a-d0 disponible en el Departamento de Transportes de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos de Valencia.

Los ejes en planta cuentan con círculos, rectas y curvas de transición de tipo clotoide habiéndose obtenido las coordenadas de puntos fijos situados cada 5 m. El error máximo asumido en el ajuste se encuentra en $\pm 0,40$ m con respecto a la línea central de separación de sentidos registrada en la ortofotografía aérea.

El ajuste en alzado resulta automático, llevando este exactamente a la lectura de terreno procedente del modelo digital como puntos discretos de cota cada 5 m, e interpolaciones lineales entre ellos.

Una vez ajustado el eje, las coordenadas (x,y,z) correspondientes a cada uno de los puntos kilométricos han permanecido invariables para todas las metodologías de obtención de visibilidades disponibles sometidas a análisis.

4.5 OBTENCIÓN DE VISIBILIDADES

En la metodología de obtención de visibilidades disponibles mediante prismas visuales, la influencia en los resultados tanto de la densidad de la nube de puntos LiDAR, como de los parámetros que definen la anchura del prisma visual (PV) y de la unidad prismática rectangular (UPR), debe ser cuantificada en casos de obstáculos diversos para

acotar su rango de validez y permitir el adecuado ajuste de parámetros a las diversas características de las muestras origen de datos.

Además, en la práctica ingenieril actual es común que el análisis de visibilidades en fase de diseño de nuevas carreteras, e incluso en el proyecto de mejora de las existentes, se lleve a cabo mediante el empleo de software específico de trazado y modelos digitales del terreno. Por este motivo, resulta de especial interés en la investigación someter a comparación, para un tramo real de carretera, los resultados obtenidos tanto por aplicación de la nueva metodología propuesta, como por el tradicional uso de software específico de diseño aplicado a modelos digitales del terreno y también a modelos digitales de superficies.

Finalmente, teniendo en cuenta que la forma de realizar la medición de visibilidades disponibles para las diferentes maniobras de parada, adelantamiento o cruce, no son únicas para todas las guías de diseño, y ello puede introducir variaciones en los resultados que pueden ser en algunos casos notables (apartado 2.1.1), a efectos de estudio comparativo entre las distintas metodologías, esta investigación considera tan solo el caso de la maniobra de parada, siendo la metodología de medición y posicionamiento de observador y obstáculo seleccionada, la establecida en la guía de diseño AASHTO 2011. Dicha elección se fundamenta en los siguientes motivos:

- El concepto de distancia de visibilidad de parada se encuentra recogida en primer lugar y en todas las guías de diseño geométrico de carreteras cuando se trata la visibilidad.
- Dentro del conjunto de dichas guías de diseño, la AASHTO 2011 constituye una de las más referenciadas a nivel internacional por las investigaciones recientes, por lo que su uso favorece la divulgación y comparación de resultados con otros estudios llevados a cabo en países diversos.
- La AASHTO 2011 establece como suficiente, para un gran número de análisis, las mediciones de distancia de visibilidad de parada realizadas según una línea ubicada en el centro de la calzada. Esta ubicación simplifica de manera considerable la localización de los puntos de observación y objetivo, eliminando el efecto que sobre dicho posicionamiento tienen carriles de anchura variable cuando la línea de referencia es el borde de la calzada, como es el caso de la norma de Trazado española 3.1 IC.
- Los avances actuales sobre la que constituirá en un futuro próximo la nueva norma de Trazado 3.1 IC incluyen una modificación sobre la altura de obstáculo a considerar en la determinación de la visibilidad de parada (Ministerio de Fomento, 2014).
- A efectos comparativos, todas las metodologías sometidas a estudio deben regirse por un mismo criterio geométrico, con independencia de la guía de diseño de la

que este se derive. Establecidas las coordenadas de los puntos, estos permanecen invariables para todas ellas a lo largo de todo el proceso de análisis.

En el análisis relativo a densidades de la nube de puntos LiDAR y de los parámetros del PV y de la UPR, se han realizado un total de 4.200 cálculos correspondientes a diferentes condiciones de tipología de obstáculo, densidad de la nube de puntos y valores de los parámetros en la totalidad del trazado de la carretera CP-29-25.

En el estudio comparativo de resultados de visibilidad disponible por la metodología de PV, MDT y MDS, se han obtenido 1.950 cálculos correspondientes a 3.250 m de trazado de la carretera CV-35 entre los PKs reales 57+040 y 60+290 en el sentido de los puntos kilométricos crecientes, con cálculos realizados en estaciones múltiplo de 5,0 m.

En los siguientes apartados se describe el proceso seguido para la obtención de visibilidades disponibles en cada una de las metodologías sometidas a comparación.

4.5.1 Visibilidades obtenidas a partir de la metodología de prisma visual

De acuerdo con lo establecido en la guía de diseño geométrico estadounidense (AASHTO 2011), la medición de la distancia de visibilidad de parada disponible se realizará según una línea ubicada en el centro de la calzada con el observador y el objetivo situados a 1,08 metros y 0,60 m de altura sobre ella, respectivamente.

Esta metodología se ha aplicado tanto a la carretera CP-29-25 para el estudio del efecto de la densidad de la nube de puntos LiDAR, como a la carretera CV-35 para el estudio comparativo con otras metodologías de cálculo de visibilidades. Las coordenadas de los puntos de observación y objetivo se localizan en ambos casos sobre el eje de la carretera previamente restituido y son tomadas hasta el milímetro.

En el estudio comparativo realizado sobre la carretera CV-35, el proceso seguido puede observarse en el esquema de la Figura 84, tal y como se describe a continuación: para cada punto de observación, el objetivo se sitúa un incremento de distancia Δd_1 , comprobando si existe o no visión de dicho punto. En caso positivo, el objetivo se vuelve a desplazar un valor Δd_1 sobre el eje repitiéndose la comprobación. En caso negativo, se finaliza el proceso para esta estación anotándose la distancia de visibilidad obtenida a partir del número de desplazamientos realizados. El proceso se inicia de nuevo para el siguiente punto de observación, situado a una distancia incremental Δd_2 sobre el eje de referencia. La distancia de visibilidad de parada disponible se obtiene de acuerdo con la Ecuación 37.

$$D_{vp} = n \cdot \Delta d_1 \quad (37)$$

Donde:

Dvp: distancia de visibilidad de parada disponible (m)

n: número de desplazamientos realizados para la posición del objetivo

Δd_1 : Incremento de distancia seleccionado (m)

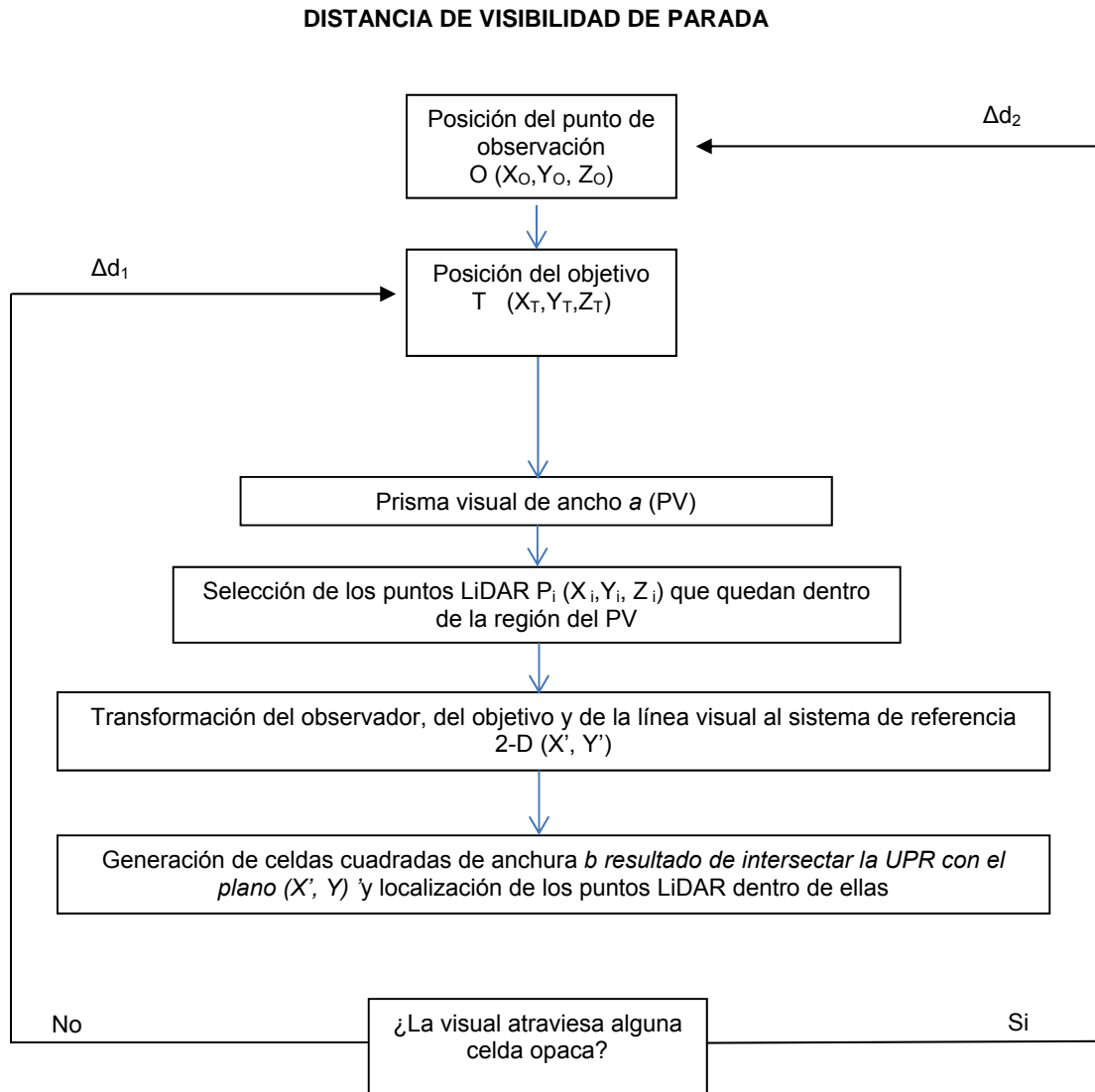


Figura 84: Diagrama del proceso seguido para la obtención de visibilidades disponibles

Con el fin de obtener un número suficiente de visuales, para el análisis comparativo entre metodologías se ha seleccionado un $\Delta d_1 = 5$ m, con el observador también situado en puntos kilométricos múltiplos de 5 m ($\Delta d_2 = 5$ m). Este intervalo, considerablemente menor que el habitualmente empleado en la práctica profesional de cálculo de visibilidades en fase de diseño (20 m), permite una mejor definición de las visibilidades a lo largo del trazado, lo que enriquece la interpretación de resultados.

Para automatizar el proceso de cálculo, se ha desarrollado asimismo una aplicación para la generación automática tanto de las líneas visuales, como de las visibilidades correspondientes a dichas líneas, implementada bajo el sistema de información geográfica de código libre GVSIG. Dicha aplicación, siguiendo la línea de referencia especificada, radia

visuales entre el punto kilométrico de observación hacia adelante en el sentido de la marcha a incrementos de longitud establecidos por el usuario (Figura 85). Este mismo incremento se emplea en la ubicación del nuevo punto de observación, todo ello de acuerdo con el procedimiento de cálculo expuesto en la Figura 84.

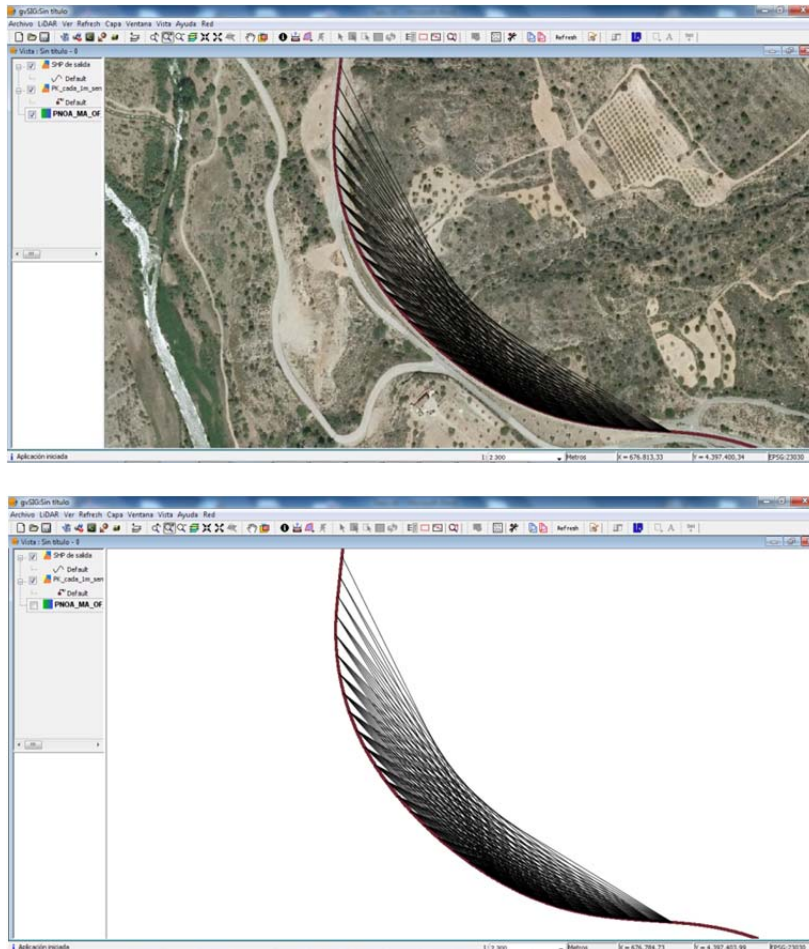


Figura 85: Captura de pantalla de líneas visuales trazadas desde diferentes observadores hacia diferentes objetivos según el algoritmo de cálculo desarrollado bajo GVSIG (carretera CV-35)

Del cálculo se obtienen tanto las coordenadas del centro de gravedad de la UPR, como de los puntos Lidar contenidos en ella así como la distancia desde el observador al objeto.

Los resultados son expresados en fichero formato *.xml* (Figura 86) mientras que la salida gráfica es posible gracias a la generación simultánea de un archivo *.kml* que permite, tanto la representación bidimensional coloreada de la línea visual mediante la aplicación GlobalMapper (trial versión), como su representación tridimensional en Nasa World Wind (Figura 87).

```

<?xml version="1.0"?>
- <VisionPoints>
  - <VisionPoint>
    - <Data>
      <Resolution_Meters>0.5</Resolution_Meters>
      <ResolutionZ_Meters>0.05</ResolutionZ_Meters>
      <MaximumHeight>404.09999999999997</MaximumHeight>
      <MinimumHeight>380.82</MinimumHeight>
    </Data>
    - <Origin_Point>
      <X>619688.68</X>
      <Y>4761592.75</Y>
      <Z>381.98</Z>
    </Origin_Point>
    - <Object_Point>
      <DistanceToObject>15.530063342709596</DistanceToObject>
      <X>619692.1775897058</X>
      <Y>4761607.881085013</Y>
      <Z>382.12</Z>
    </Object_Point>
    - <Destiny_Point>
      <X>619721.61</X>
      <Y>4761735.21</Y>
      <Z>382.88000000000005</Z>
  </VisionPoint>
</VisionPoints>
  
```

Figura 86: Captura de pantalla de resultados del cálculo expresados en fichero formato *.xml* a partir de la aplicación específica implementada en GVSIG

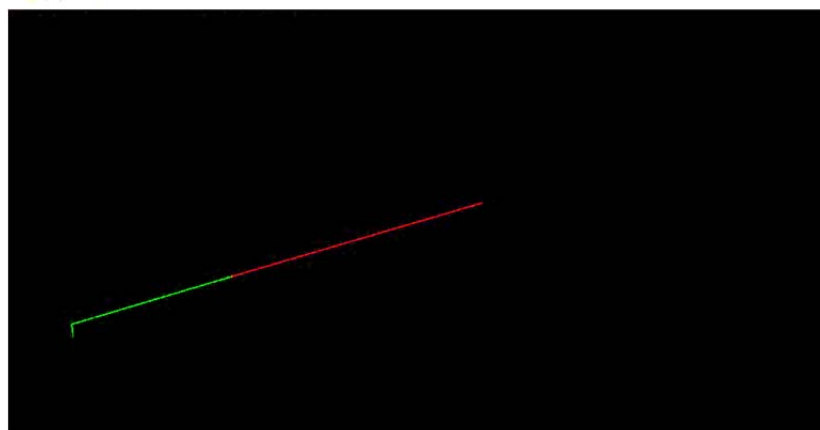
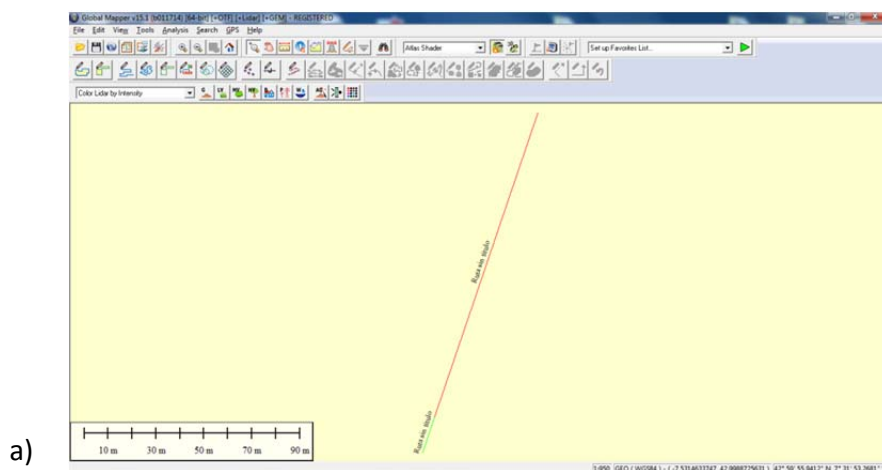


Figura 87: Captura de pantalla de resultado gráfico en formato *.kml* en dos dimensiones GlobalMapper (trial versión) (a), y en tres dimensiones, Nasa World Wind (b)

La validación de los resultados obtenidos para cada línea visual trazada entre observador y objetivo se lleva a cabo mediante su visualización conjunta con la nube de puntos LiDAR.

Efecto de la densidad de la nube de puntos LiDAR

Debido al sistema de captura empleado, los datos de la carretera CP-29-25 son la base del análisis llevado a cabo para cuantificar el efecto de diferentes densidades en la nube de puntos LiDAR en relación a las dimensiones del Prisma Visual (PV) y de la Unidad Prismática Rectangular (UPR).

Para ello, para cada una de las muestras de diferente densidad generadas, se analizan visuales concretas trazadas desde un mismo punto de observación y un mismo punto objetivo con variación simultánea de los parámetros definitorios de las dimensiones del PV y de la UPR.

Dentro de la muestra, se han localizado y analizado dos casos que producen obstrucción a la visión y que son habituales en carreteras:

- Caso1) Talud de desmonte situado en el interior de una curva
- Caso 2) Vegetación situada en el interior de una curva

Como complemento a los resultados obtenidos en el análisis de densidades de la nube de puntos LiDAR y de las dimensiones del PV y de la UPR llevados a cabo en la carretera CP-29-25, se ha incluido también el caso de un acuerdo convexo dentro del tramo de muestra de la carretera CV-35 que se sitúa en coincidencia con una recta en planta. Las características del trazado de la CP-29-25 impiden que se pueda llevar a cabo este análisis sobre ella. Este caso constituye, junto con los dos anteriores, el tercero sometido a estudio:

- Caso 3) Acuerdo vertical convexo

Para cada uno de los casos analizados se han contabilizado además los tiempos de proceso necesarios para el cálculo de cada visual, lo que ha permitido además contrastar el efecto sobre el tiempo de proceso de la consideración de una u otra densidad de muestra.

Estudio comparativo entre diferentes metodologías de obtención de visibilidades:

Los datos de la carretera CV-35 son asimismo la base del análisis comparativo de resultados obtenidos mediante la nueva metodología de estimación de visibilidades disponibles basada en Prismas Visuales (PV) y otras diferentes basadas en la aplicación de software de diseño a un MDT y a un MDS de la carretera. También se han analizado las diferencias con los resultados de visibilidad que habrían podido ser obtenidos en fase de diseño con perfiles teóricos de proyecto. Para ello, la obtención de visuales se ha llevado a cabo en un tramo de 3.250 m de longitud.

El hecho de analizar también los perfiles teóricos de proyecto, supone poder introducir en el análisis los resultados de visibilidad que supuestamente se habrían obtenido en fase de diseño, pudiendo de este modo cuantificar las diferencias con los resultados obtenidos con la nueva metodología aplicada a datos LiDAR mobile del entorno de la carretera, lo que permitirá contrastar, para la muestra analizada, la hipótesis inicial que supone que, en fase de proyecto, puede sobreestimarse la visibilidad realmente disponible en fase de explotación.

Para ello, dado que en fase de diseño la opción más habitual, en la práctica ingenieril para troncos de carretera, es la de emplear equidistancia entre perfiles de 20 m, esta ha sido la empleada cuando se comparan resultados basados en perfiles de proyecto con resultados basados en PV, lo que supone un total de 162 puntos de observación situados sobre el eje de la carretera.

En el resto de comparativas, basadas en MDT, MDS y PV, el observador se sitúa cada 5,0 m, lo que arroja un total de 650 puntos de cálculo situados sobre el eje de la carretera. Esta equidistancia permite un análisis más detallado de resultados para estos tres modelos, al margen de la práctica habitual de los proyectistas.

Las características de la CV-35 en este tramo han ofrecido obstáculos diversos a la visión, relacionados tanto con la propia geometría de la carretera (planta, alzado y sección transversal), como con la presencia de otros obstáculos que no son tan habitualmente considerados en la obtención de visibilidades en fase de diseño, tales como vegetación, muros o sistemas de contención.

Para cada uno de los puntos de observación se han obtenido vistas tridimensionales representadas en el visualizador Nasa World Wind con la nube de puntos incorporada, lo que ha permitido la interpretación y localización de obstáculos y la validación de los resultados obtenidos para cada visual.

En la Figura 88 pueden observarse los resultados de visibilidad de parada disponible con la metodología de prismas visuales para las dimensiones de 0,50 m de anchura de PV y 0,05 m de altura de UPR.

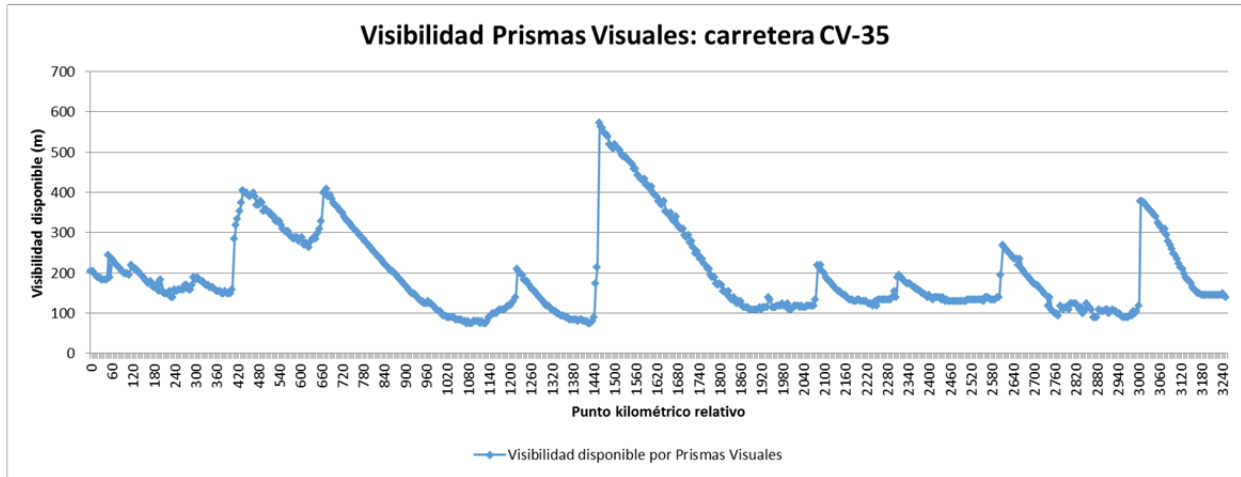


Figura 88: Visibilidades disponibles obtenidas por la metodología de prismas visuales (carretera CV-35)

4.5.2 Visibilidades obtenidas a partir del MDT generado con datos LiDAR aéreo

Para la obtención de visibilidades disponibles a partir de software de diseño geométrico y MDT, la medición de la distancia de visibilidad de parada disponible también se lleva a cabo según la línea de referencia ubicada en el centro de la calzada (línea de separación de sentidos), con el observador y el objetivo situados a 1,08 metros y 0,60 m de altura sobre la calzada, respectivamente.

El software de diseño empleado es el CLIP Versión 1.27.54.265.0g-0a-d0 disponible en el Departamento de Transportes de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos de Valencia. Este software obtiene distancias de visibilidad mediante la metodología basada en perfiles transversales descrita en el apartado 2.2.2.2 (Figura 89).

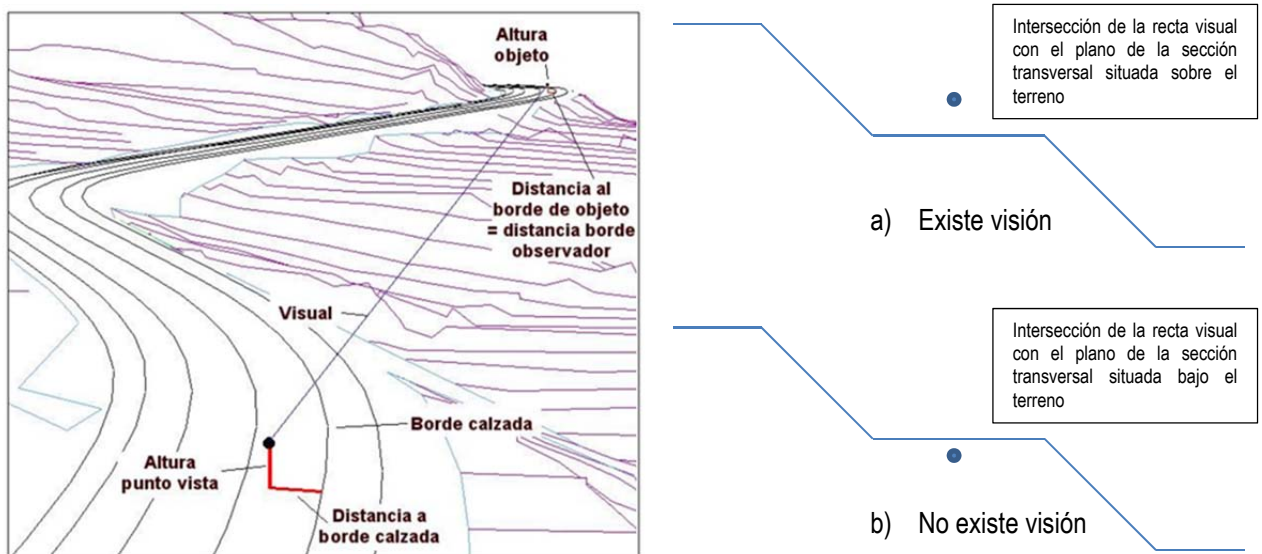


Figura 89: Determinación de la existencia o no de visión según la metodología empleada por el software de diseño geométrico CLIP (V-1.27.54.265.0g-0a-d0)

Los perfiles transversales responden a la restitución geométrica del eje llevada a cabo para el tramo de carretera y tomada como referencia invariable para la aplicación de todas las metodologías analizadas (Figura 90).



Figura 90: Restitución geométrica del eje con ubicación de marcas fijas referencia de perfiles transversales cada 5,0 m (carretera CV35)

Para la obtención de visibilidades disponibles, los parámetros que incluye el software para el cálculo de distancias de visibilidad se han establecido en los siguientes valores:

- Despeje: 100 m (valor suficientemente grande como para que no imponga limitaciones a la visión por obstáculos no considerados en el MDT)
- Altura del observador: 1,08 m de acuerdo con las especificaciones AASHTO, 2011
- Altura del objeto: 0,60 m de acuerdo con las especificaciones AASHTO, 2011
- Línea de referencia: eje
- Distancia de observador y obstáculo a la línea de referencia: 0,0 m
- Distancia de visibilidad máxima considerada: 1.000 m (valor suficientemente grande como para no limitar los valores de distancia de visibilidad obtenidos del cálculo)

De modo coherente con la forma de medir visibilidades en el resto de metodologías, la ubicación de los puntos de observación se establece sobre el eje de referencia cada 5,0 m. La lectura de perfiles transversales se lleva a cabo directamente por el programa sobre la cartografía curvada procedente del MDT.

De igual modo, para no introducir variaciones en los resultados derivados de un ajuste en cota mediante rasantes rectas y acuerdos verticales, el ajuste en alzado se ha realizado de forma automática, llevando cada perfil transversal a la cota correspondiente del terreno obtenida del MDT. Los peraltes se han ajustado manualmente para reproducir la pendiente transversal del terreno modelizado y los taludes de excavación y relleno son directamente los resultantes de la lectura del MDT sin ninguna modificación sobre ellos.

La Figura 91 representa los resultados obtenidos en el tramo de carretera CV-35 según esta metodología y que son asimismo analizados en apartados posteriores de esta investigación.

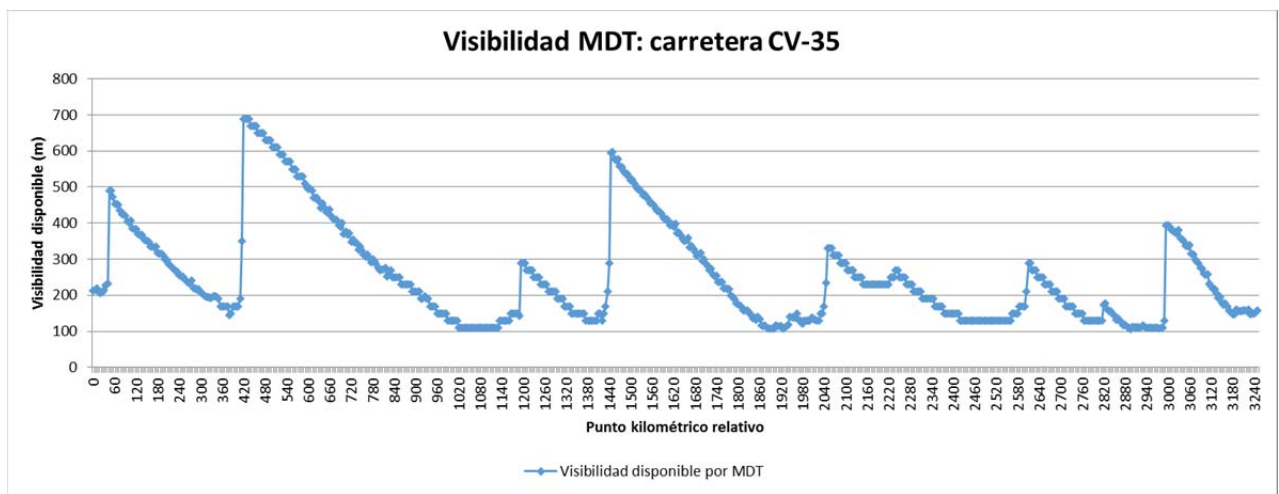


Figura 91: Visibilidades disponibles obtenidas mediante software de diseño sobre el MDT (carretera CV-35)

4.5.3 Visibilidades obtenidas a partir del MDS generado con datos LiDAR aéreo y LiDAR mobile

Al igual que en los dos casos anteriores, la medición de la distancia de visibilidad se realiza según la línea de separación de sentidos ubicada en el centro de la calzada, con el observador y el objetivo situados de nuevo a 1,08 metros y 0,60 m de altura sobre la calzada, respectivamente, de acuerdo con criterios AASHTO (2011). La ubicación de los puntos de observación se establece también sobre el eje de referencia cada 5,0 m.

El software de diseño empleado es el CLIP Versión 1.27.54.265.0g-0a-d0 disponible en el Departamento de Transportes de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos de Valencia.

Al igual que en la sistemática de cálculo seguida para la obtención de visibilidades por MDT, los parámetros que incluye el software para el cálculo de distancias de visibilidad se han establecido también con los siguientes valores:

- Despeje: 100 m (valor suficientemente grande como para que no imponga limitaciones a la visión por obstáculos no considerados en el MDS)
- Altura del observador: 1,08 m de acuerdo con las especificaciones AASHTO, 2011
- Altura del objeto: 0,60 m de acuerdo con las especificaciones AASHTO, 2011
- Línea de referencia: eje
- Distancia de observador y obstáculo a la línea de referencia: 0,0 m
- Distancia de visibilidad máxima considerada: 1.000 m (valor suficientemente grande como para no limitar los valores de distancia de visibilidad obtenidos del cálculo)

La lectura de perfiles transversales se lleva a cabo directamente por el programa sobre la cartografía curvada procedente del MDS.

De nuevo, para no introducir variaciones en los resultados derivados de un ajuste en cota mediante rasantes rectas y acuerdos verticales, el ajuste en alzado se ha realizado de forma automática, llevando cada perfil transversal a la cota correspondiente del terreno obtenida del MDS. Los peraltes se han ajustado manualmente para reproducir la pendiente transversal del terreno modelizado y los taludes de excavación y relleno son directamente los resultantes de la lectura del MDT sin ninguna modificación sobre ellos.

En la Figura 92 pueden observarse los resultados obtenidos en el tramo de carretera CV-35 considerado en el análisis.

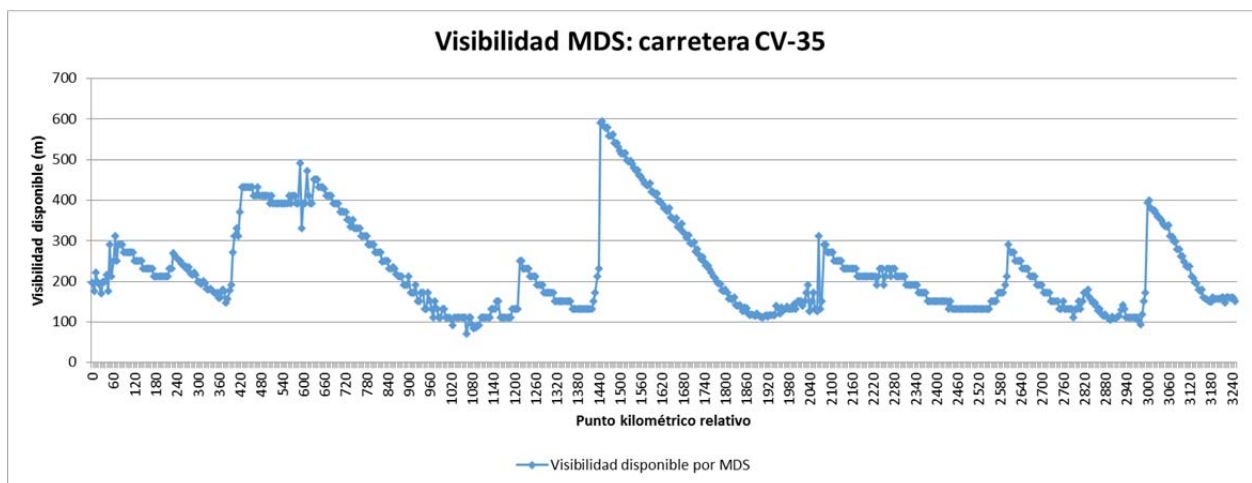


Figura 92: Visibilidades disponibles obtenidas mediante software de diseño sobre el MDS (carretera CV-35)

4.5.4 Visibilidades obtenidas a partir de perfiles teóricos de proyecto

La medición de la distancia de visibilidad se realiza también según la línea de separación de sentidos ubicada en el centro de la calzada, con el observador y el objetivo situados de nuevo a 1,08 metros y 0,60 m de altura sobre la calzada, respectivamente, de acuerdo con criterios AASHTO (2011). La ubicación de los puntos de observación se establece sobre el eje de referencia, pero en este caso cada 20 m, como habitualmente se realiza en la práctica ingenieril. Evidentemente, dicho eje es el mismo en todas las metodologías.

Al igual que en los casos anteriores, los parámetros que incluye el software para el cálculo de distancias de visibilidad se han establecido también con los siguientes valores:

- Despeje: 100 m (valor suficientemente grande como para que no imponga limitaciones a la visión por obstáculos no considerados en el MDS).
- Altura del observador: 1,08 m de acuerdo con las especificaciones AASHTO (2011).
- Altura del objeto: 0,60 m de acuerdo con las especificaciones AASHTO (2011).
- Línea de referencia: eje.
- Distancia de observador y obstáculo a la línea de referencia: 0,0 m.
- Distancia de visibilidad máxima considerada: 1.000 m (valor suficientemente grande como para no limitar los valores de distancia de visibilidad obtenidos del cálculo).

El ajuste en alzado y en sección transversal se ha realizado de modo que con el perfil transversal teórico, se reproduzca la forma del terreno resultante cuando se consideran los datos que mejor reproducen la realidad ejecutada (datos LiDAR mobile). Esta es una forma de considerar que el proyecto se ha ejecutado sin modificaciones pero con las pequeñas variaciones propias del proceso constructivo.

En la Figura 93 pueden observarse los resultados obtenidos en el tramo de carretera CV-35 considerado en el análisis.

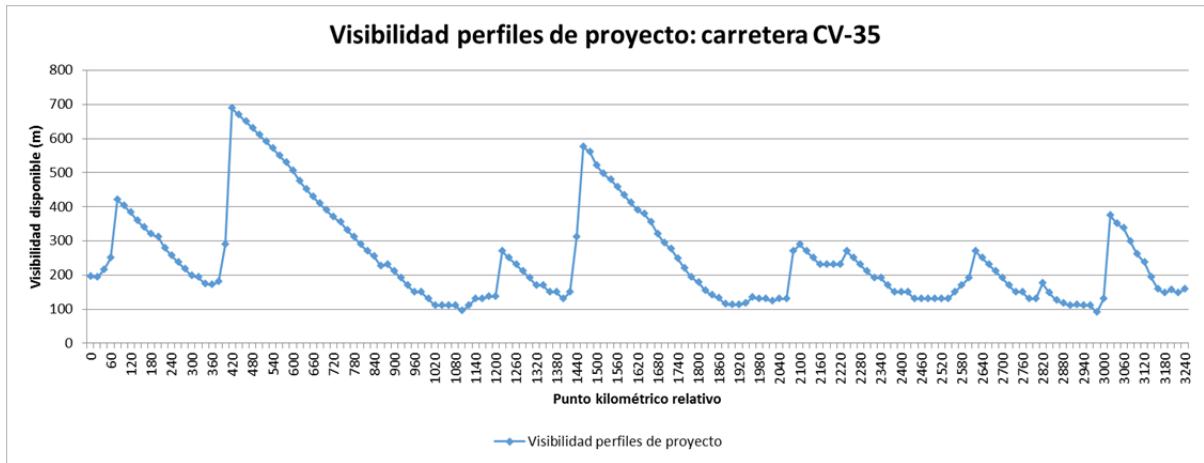


Figura 93: Visibilidades disponibles obtenidas mediante software de diseño con perfiles teóricos de proyecto (carretera CV-35)

4.6 DISCUSIÓN

En este apartado se lleva a cabo un doble análisis:

- Por un lado, para una carretera existente se analizan, tanto las capacidades de localización de obstáculos que proporciona la metodología de Prismas Visuales (PV), como los diferentes resultados de visibilidad disponible obtenidos por dicha metodología cuando se compara con las tradicionales herramientas de evaluación basadas en modelos digitales de elevaciones (MDT y MDS) que pueden ser obtenidos de esa carretera.
- Por otro lado, para comprobar si los resultados en fase de diseño se aproximan a los reales en fase de explotación, se han analizado y comparado los resultados de visibilidad que se habrían obtenido mediante software comercial durante la realización del proyecto, con los arrojados por la nueva metodología de PV aplicada a la toma de datos LiDAR de la carretera en servicio. Para ello y tal y como se ha comentado en apartados anteriores, ha sido necesaria la simulación de dichos perfiles de modo que reproduzcan la realidad ejecutada haciendo uso de todas las herramientas de incorporación de obstáculos tales como barreras o muros de contención de que disponga el software.

Cuando se emplea la nueva metodología de prismas visuales, se analizan también los puntos obstáculo detectados dentro de una línea visual considerando diferentes densidades en la nube de puntos Lidar y diferentes parámetros de anchura y altura del prisma visual y de la unidad prismática rectangular.

Finalmente, la representación conjunta de las visibilidades obtenidas según la metodología de prismas visuales y software de diseño aplicado a modelos digitales del terreno y a modelos digitales de superficies para un caso real de trazado, así como a la simulación de lo que habrían sido los perfiles transversales de diseño, pretende cuantificar las diferencias obtenidas, interpretarlas y poner de manifiesto su importancia en la evaluación de la seguridad vial.

4.6.1 Efecto de la frecuencia de escaneo LiDAR sobre la localización de obstáculos. Dimensiones del prisma visual y de la unidad prismática rectangular

A los efectos de esta investigación, entenderemos como frecuencia de escaneo LiDAR, el número de haces láser por segundo enviados en diferentes direcciones para la medición de una distancia y para el posicionamiento georreferenciado de un punto a partir de dicho haz. La frecuencia de escaneo LiDAR será por tanto, el número máximo de puntos que un sistema LiDAR puede posicionar y georreferenciar en un segundo. De este modo, esta cota superior solo podrá ser alcanzada en caso de que todos los haces hubieran realizado un viaje de ida y vuelta con intensidad de señal suficiente como para ser correctamente identificados por el receptor.

De acuerdo con esta definición de frecuencia, el número de puntos realmente georreferenciado por unidad de tiempo dependerá de las características del entorno de la carretera. En la mayoría de los tramos de carretera existentes, un gran número de haces de luz serán lanzados hacia el espacio abierto o en puntos muy alejados y no posicionarán ningún tipo de objeto por ausencia de rebote o por insuficiencia en la intensidad de la señal de reflejo.

Por otro lado, el concepto de densidad de puntos LiDAR, definida como el número de puntos por unidad de superficie, posee una variabilidad atribuible tanto a la velocidad de circulación del vehículo, como a la distancia del objeto y a las características propias de su superficie. Esta dependencia de variables, que distan de ser constantes durante el proceso de escaneado, impide que la densidad pueda ser considerada a priori, como un parámetro característico y unívoco de cada muestra. La frecuencia de escaneado sin embargo, forma parte de la información técnica de los equipos y permite establecer conclusiones prácticas sobre su capacidad de uso en condiciones normales de circulación del vehículo de toma de datos.

Para este estudio, se cuenta con muestras obtenidas con diferentes frecuencias. La carretera CV-35, tomada con tres escáneres SICK de funcionamiento simultáneo, ha sido obtenida con una frecuencia de escaneado total de 40 kHz, mientras que la nube de puntos LiDAR de la carretera CP-29-25, ha sido obtenida mediante dos láseres escáner OPTTECH con una frecuencia de escaneado total de 1MHz, muy superior a la anterior, lo que permite ampliar el rango de análisis.

Con este fin, partiendo de la muestra de mayor frecuencia se ha llevado a cabo una reducción del número de datos total para la obtención de tres muestras adicionales de densidad submúltiplo de la original, con relaciones $D1/D_i = 2, 4$ y 8 para $i = 2, 3$ y 4 respectivamente. La nomenclatura empleada para dichas muestras es la siguiente:

- **D1:** muestra original.
- **D2:** muestra que contiene un 50% de los datos originales, eliminando del fichero original D1, uno de cada dos datos consecutivos (relación $D1/D2=2$).
- **D3:** muestra que contiene un 25% de los datos originales, eliminando del fichero uno de cada dos datos consecutivos del conjunto D2 (relación $D1/D3=4$).
- **D4:** muestra que contiene un 12,5% de los datos originales, eliminando del fichero uno de cada dos datos consecutivos del conjunto D3 (relación $D1/D4=8$).

La estructura *.las* y los atributos de los datos originales se mantiene invariable en todos los casos de modo que sean igualmente válidos los algoritmos de cálculo.

El abanico de frecuencias así obtenido, equivale a una toma de datos de la carretera CP-29-25 con frecuencias variables pero manteniendo, sin embargo, las mismas características de velocidad, trazada y orientación del vehículo. Por su parte, la carretera CV-35 supone la cota inferior de frecuencia de escaneado de los equipos actuales, por lo que la muestra original no es sometida a ningún tipo de reducción.

Partiendo de las muestras de datos LiDAR de las dos carreteras disponibles, se han seleccionado casos de análisis que se correspondan con obstáculos a la visión diversos y de presencia habitual en carreteras:

- Caso 1) Talud de desmonte situado en el interior de una curva:
 - Carretera CP-29-25.
 - Carretera CV-35.
- Caso 2) Vegetación situada en el interior de una curva:
 - Carretera CP-29-25.
- Caso 3) Acuerdo vertical convexo:
 - Carretera CV-35.

Los resultados de visibilidad obtenidos se han analizado para anchuras del PV variables entre 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5 m y alturas de la UPR (Unidad Prismática Rectangular) de 0,03; 0,05 y 0,10 m.

Las anchuras de PV seleccionadas permiten analizar resultados para valores diversos pero próximos a la tradicional consideración de una única línea visual. El menor valor de anchura 0,1 m se considera la región del espacio mínima más próxima a esa concepción, mientras que 0,50 m es un valor superior pero suficientemente próximo habida cuenta de la magnitud de las distancias de visibilidad en carreteras. El resto de anchuras permiten contemplar una variación continua entre estos dos valores.

Por su parte, las alturas de UPR resultan coherentes con las actuales precisiones absolutas de los puntos LiDAR mobile (Figura 94):

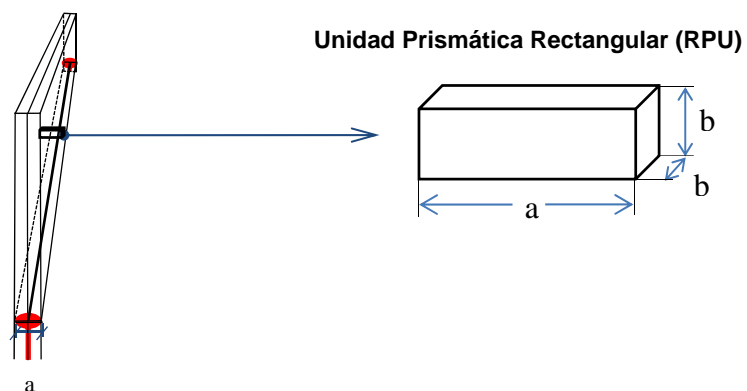


Figura 94: Dimensiones a y b que definen la anchura del PV y el volumen de la UPR

Las 20 combinaciones consideradas son por tanto las expresadas en la Tabla 10.

Tabla 10: Dimensiones del PV y de la UPR consideradas en el análisis

DIMENSIONES CONSIDERADAS EN EL ANÁLISIS PARA LA UPR				
	b (m)			
a (m)	0,03	0,05	0,07	0,10
0,10	0,10x0,03x0,03	0,10x0,05x0,05	0,10x0,07x0,07	0,10x0,10x0,10
0,20	0,20x0,03x0,03	0,20x0,05x0,05	0,20x0,07x0,07	0,20x0,10x0,10
0,30	0,30x0,03x0,03	0,30x0,05x0,05	0,30x0,07x0,07	0,30x0,10x0,10
0,40	0,40x0,03x0,03	0,40x0,05x0,05	0,40x0,07x0,07	0,40x0,10x0,10
0,50	0,50x0,03x0,03	0,50x0,05x0,05	0,50x0,07x0,07	0,50x0,10x0,10

Para todos los casos se han contabilizado además los tiempos de proceso necesarios.

4.6.1.1 Caso 1: Limitación de visión por presencia de un talud de desmonte situado en el interior de una curva

La presencia de un talud de desmonte junto a la calzada limitando la distancia de visibilidad disponible es un caso habitual de limitación de la visión en carreteras que se encuentra presente en algunos tramos de las dos carreteras analizadas CV-35 y CP-29-25.

En este caso, la consideración de una línea visual establece en la tangencia con el talud la condición de máxima visibilidad (Figura 95); sin embargo, la incorporación del concepto de prisma visual en sustitución de la tradicional línea visual, introduce una variación en la existencia o no de visión que está relacionada con la anchura de dicho prisma (Figura 96).

En el caso teórico más simple, con un talud de desmonte vertical equidistante de la carretera, la línea visual trazada desde un observador hasta un punto objetivo que intersecta dicho talud, puede incidir en él con diferentes ángulos (Figura 96 a). La tangencia entre el prisma y el talud será la situación más restrictiva para que dicha línea pueda ser dibujada entre ambos puntos sin interrupción (Figura 96 b). La Figura 96 c sin embargo, muestra cómo el prisma visual impide la visibilidad de un punto que sí habría sido visible bajo la hipótesis de líneas visuales.

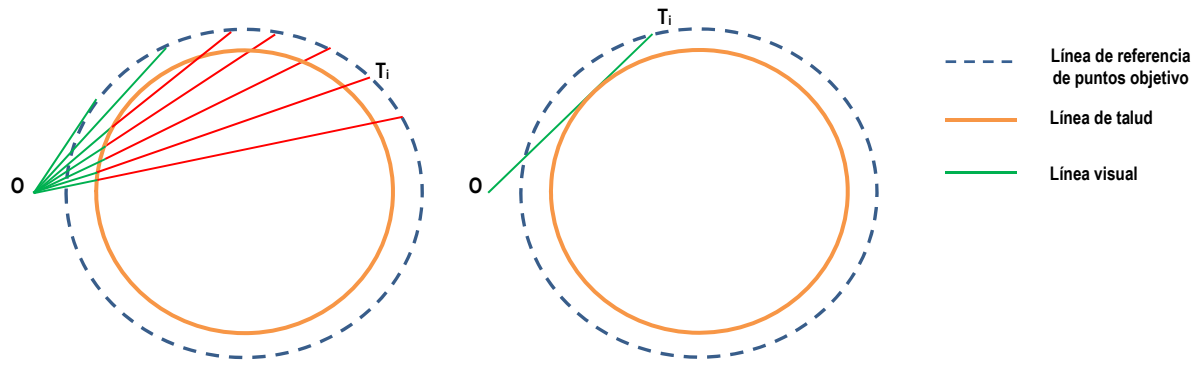


Figura 95: Diferentes ángulos de incidencia en el talud de la línea visual y línea visual tangente que delimita la posición de mayor distancia de visibilidad desde un observador O.

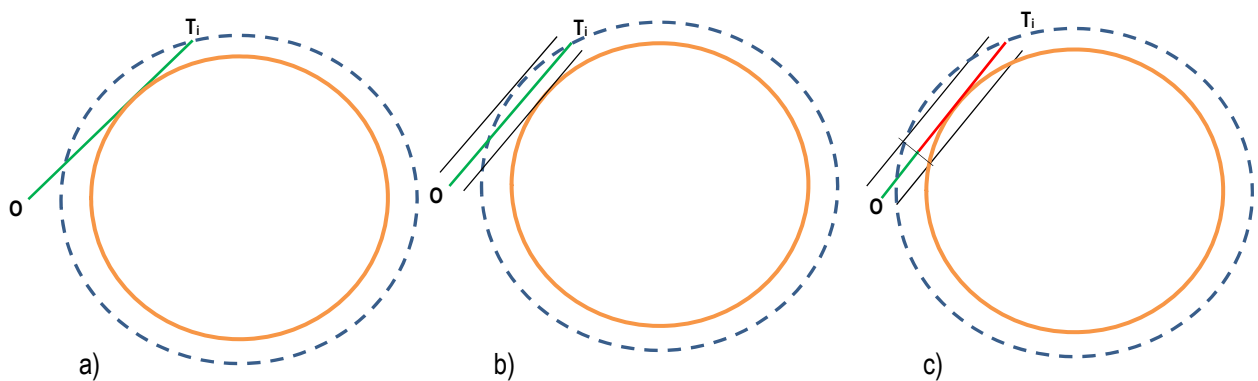


Figura 96: Efecto de la anchura de PV en la determinación de la visibilidad de un objetivo T_i (b, c) en contraposición a la tradicional línea visual (a)

De este modo, la metodología de prismas visuales supone una nueva forma de concebir la visibilidad entre dos puntos, donde el ángulo de incidencia y la anchura del PV afectan a los diferentes resultados de localización del punto en que la línea visual debe considerarse obstaculizada.

Desde esta perspectiva, la superficie de intersección de un prisma de anchura a , y altura b , con un plano vertical se ve incrementada con el ángulo que éste forma con la ortogonal a la visual α_i según la expresión de la Ecuación 38 (Figura 97).

$$S_i = \frac{S}{\cos(\alpha_i)} \quad (38)$$

Donde:

$S = a \cdot b$ (m²)

a: anchura del PV (m)

b: altura de la UPR (m)

α_i : ángulo que forma el plano vertical i con el plano ortogonal a la línea visual

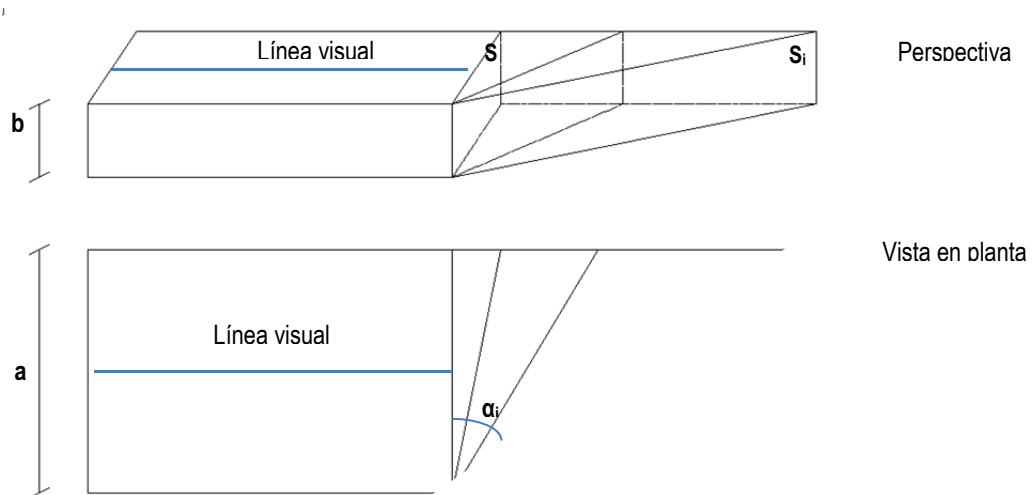


Figura 97: Diferentes secciones resultantes de la intersección de un plano vertical i con un prisma de anchura a y altura b supuesta una línea visual horizontal

Esta sección resulta mínima cuando el plano vertical de intersección es ortogonal a la línea visual ($\alpha_i=0$), en cuyo caso, la superficie resultante, dependiente de la anchura y altura del prisma visual, toma los valores resumidos en la Tabla 11 para diferentes valores de a y b .

Tabla 11: Superficies de una sección vertical ortogonal a la línea visual ($\alpha_i=0$) para diferentes valores de anchura a y altura b de dicho prisma

Superficie (m ²)					
	a (m)				
b (m)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,03	0,003	0,006	0,009	0,012	0,015
0,05	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025
0,07	0,007	0,014	0,021	0,028	0,035
0,1	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050

De acuerdo con el procedimiento propuesto para la identificación de obstáculos, para que no se produzca una falsa penetración de la visual a través del talud debe existir al menos un punto LiDAR dentro del área de intersección con el prisma.

De acuerdo con el método de PV propuesto, la Tabla 12 resume las densidades equivalentes mínimas de puntos por m² que deben obtenerse en el escaneado LiDAR de la superficie del talud para no generar falsas visibilidades.

Tabla 12: Densidad de puntos mínima teórica por debajo de la cual se puede producir la penetración de la visual en el talud

Densidad de puntos mínima (pts/m ²)					
	<i>a</i> (m)				
<i>b</i> (m)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,03	333	167	111	83	67
0,05	200	100	67	50	40
0,07	143	71	48	36	29
0,1	100	50	33	25	20

Las densidades obtenidas por los equipos IPS-2 y Optech son función de sus frecuencias de escaneado, de la velocidad del vehículo, de la distancia de la superficie al escáner y de la morfología y características de la propia superficie. A modo orientativo, en calzada, las densidades medias de las muestras empleadas en esta investigación son de 113 y 2.520 pts/m² respectivamente, que por su proximidad y orientación respecto a los sistemas, así como por las características de los pavimentos, pueden considerarse cotas superiores de densidad disponible en el análisis.

Con esta condición, las combinaciones de altura de la UPR de 0,03 m y anchuras del PV de 0,1 y 0,2 m, puede resultar en valores insuficientes de densidad en la muestra de datos original tomada con equipo IPS-2 cuando la incidencia de la visual es ortogonal a la superficie, incluso en las superficies más próximas al equipo.

El equipo Opetch Lynx por su parte, proporciona suficiente densidad de puntos en todos los casos para su muestra original a nivel de calzada en las densidades D1, D2, D3 y D4. La muestra D4 (muestra original reducida en la relación 1/8), sin embargo, puede no resultar de suficiente densidad para las dimensiones de prisma $a = 0,1$ m y $b = 0,03$ m cuando la incidencia de la visual sea ortogonal a la superficie.

Siguiendo con este análisis, en la Figura 98 se representan las proyecciones sobre el plano horizontal de las secciones de varios taludes verticales con un mismo punto de paso O y diferente ángulo α_i sobre prismas visuales de diferente anchura PV_{*i*}. Este ángulo es de nuevo el formado entre el plano del talud y la ortogonal a la línea visual, de modo que, con $\alpha_i = 0$, la incidencia de la línea de visión en el talud es ortogonal.

En ese caso, para un incremento en la anchura del prisma visual Δa dado y conocido el ángulo α_i , se verifica la expresión de la Ecuación 39.

$$\Delta d = \frac{\Delta a}{2} \tan \alpha_i \quad (39)$$

Siendo Δd la distancia sobre la línea visual en el plano XY de los puntos P_{ij} correspondientes al talud i y al prisma visual j .

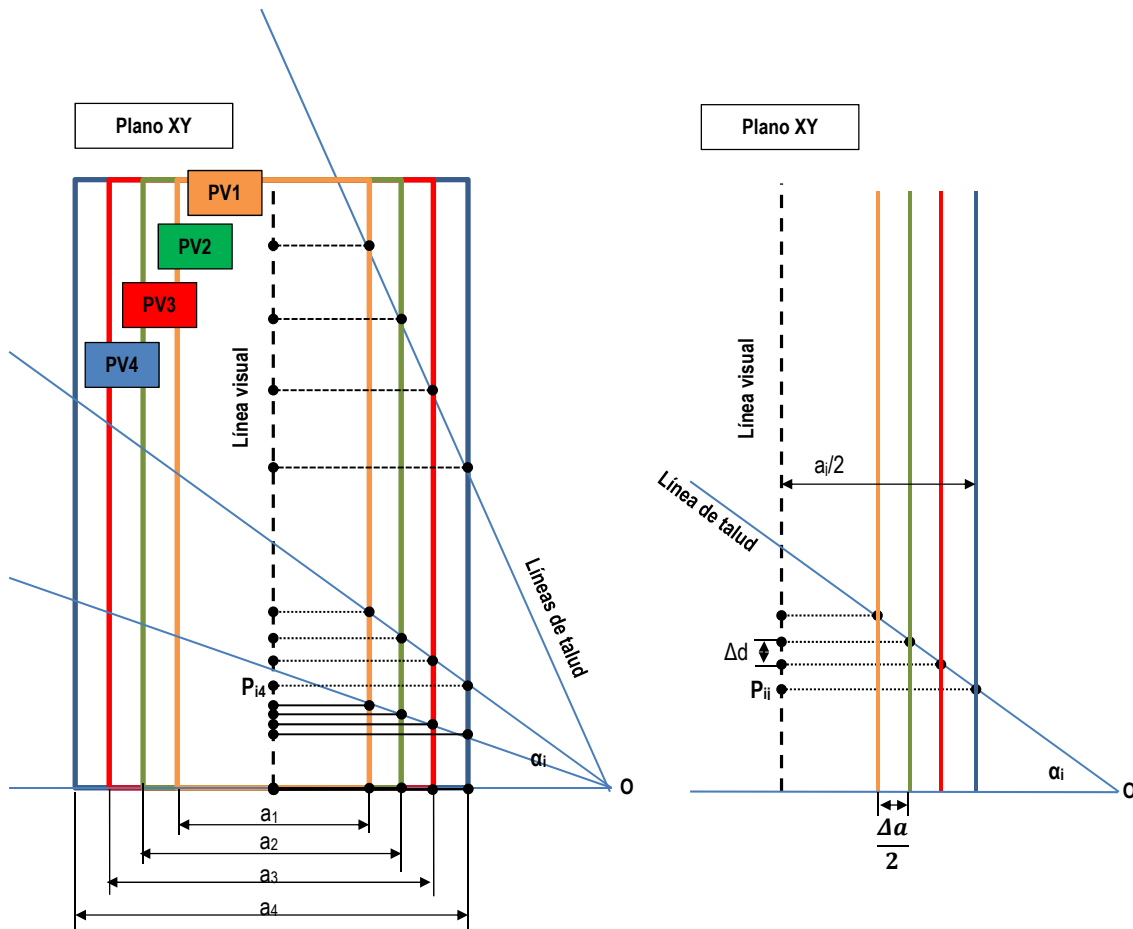


Figura 98: Diferencia en el posicionamiento de los puntos de interrupción a la visión para diferentes ángulos de incidencia de la línea de visión sobre el talud y diferentes anchuras de PV

Evidentemente, para la misma línea visual, a mayor ángulo α_i y mayor Δa con respecto a una anchura de prisma inicial, mayor será la distancia entre los puntos P_{ij} correspondientes.

De este modo, se hace evidente que el ángulo de incidencia de la línea visual sobre el talud tiene un efecto sobre la posición del obstáculo detectado, que se suma al producido por las diferentes características de la nube de puntos LiDAR y por la altura de la UPR. Las anchuras de PV menores pueden, por tanto, arrojar un posicionamiento de obstáculo más alejado del observador que el que se obtendría con una anchura de PV mayor.

Esta circunstancia geométrica, supondría variaciones sobre la estimación del punto de obstrucción que serían diferentes para cada ángulo α_i y cada Δa aún manteniendo invariables la densidad de la nube de puntos y la altura b de la UPR. De este modo:

- Para ángulos $\alpha_i \leq 45^\circ$ y anchuras de PV consideradas entre 0,1 y 0,5 m ($\Delta a \text{ máx} = 0,4 \text{ m}$), se obtiene un Δd máximo en el plano XY de 0,2 m a lo largo de la línea visual.
- Para ángulos $\alpha_i \leq 80^\circ$ y anchuras de PV consideradas entre 0,1 y 0,5 m ($\Delta a \text{ máx} = 0,4 \text{ m}$), se obtiene un Δd máximo en el plano XY de 1,13 m a lo largo de la línea visual.
- Para ángulos α_i próximos a 90° , la diferencia en el posicionamiento del obstáculo puede ser, sin embargo, muy significativa. Así, para un valor de α_i de $89,9^\circ$ y un incremento en la anchura del prisma visual máximo de 0,4 m, el valor teórico de distancia entre los puntos P_{ij} resultaría, $\Delta d = 114,59 \text{ m}$. En el caso de curvas a derechas, este podría ser el caso de taludes, muros u otros obstáculos que acompañaran al trazado de forma próxima a la tangencia con el prisma visual PV.
- En el caso particular $\alpha_i = 90^\circ$, correspondiente al paralelismo entre la línea visual y la línea de talud, la detección o no de dicho talud como un obstáculo, dependerá tanto de la separación entre ambas líneas como de la anchura del prisma visual considerada. La separación S_k y la anchura a del PV, determinan la existencia o no de visión (Figura 99).

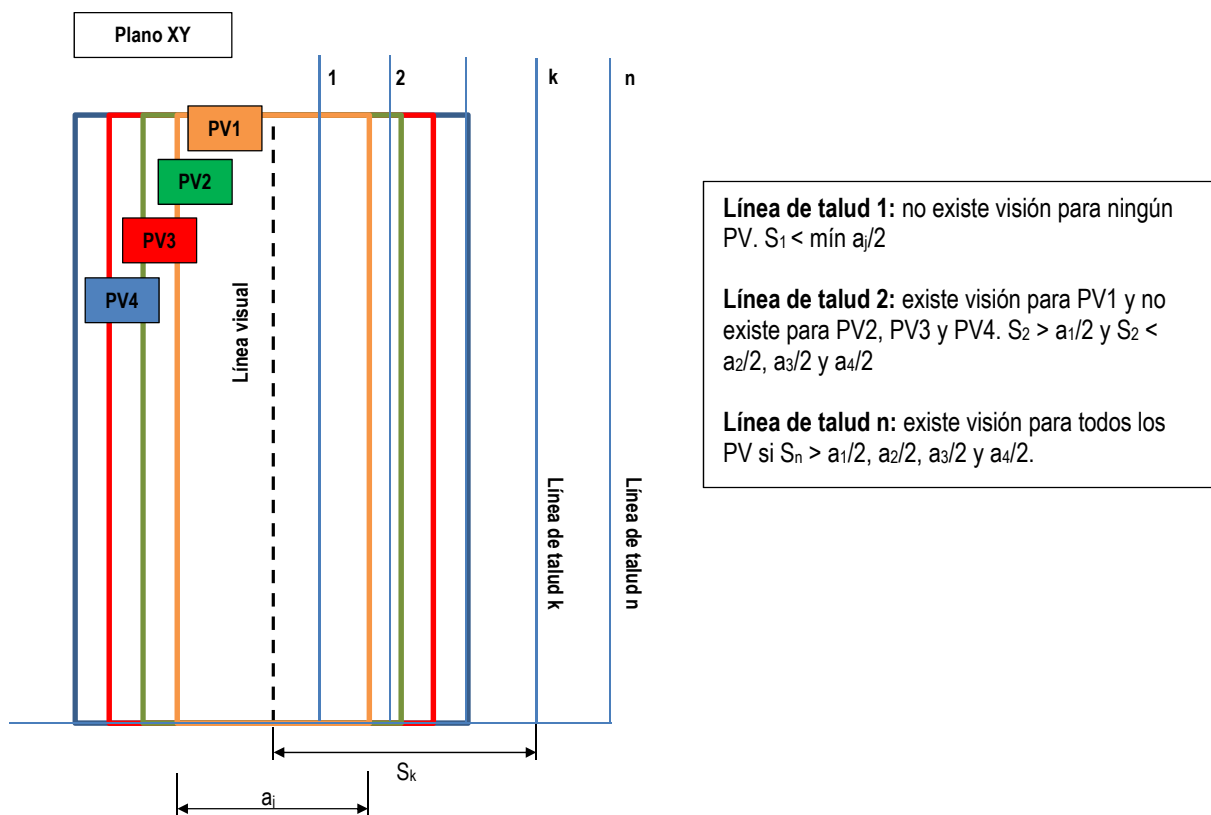


Figura 99: La separación entre el talud y la línea visual y la anchura de PV en caso de paralelismo o tangencia determinan la existencia o no de visión

A pesar de ello, este análisis geométrico tiene una importancia limitada a efectos prácticos en la evaluación de la distancia de visibilidad disponible ya que el fin de la visual trazada, es concluir si un determinado punto objetivo resulta visible o no desde un observador dado, siendo secundaria la identificación precisa de la posición del obstáculo que ha impedido la visión. Las diferencias en el posicionamiento del obstáculo no constituyen en sí el objetivo de la metodología, pero sí permiten analizar las penetraciones de los PV en las nubes de puntos que puedan dar lugar a falsos resultados de visión.

De esta forma, para sopesar el efecto de las diferencias puestas de manifiesto para distinta anchura de PV, éstas deben relacionarse en cada caso con sus correspondientes variaciones sobre la distancia de visibilidad obtenida.

En el caso de la distancia de visibilidad de parada, de acuerdo con las guías de diseño actuales su medición debe realizarse tomando como referencia la línea de separación de sentidos de circulación, el centro del carril, o una línea equidistante del borde de la calzada.

En el caso analizado, resulta evidente que en un tramo recto el efecto de la anchura del PV resulta intrascendente, sin embargo, en un tramo curvo, la estimación de la distancia de visibilidad disponible se encuentra relacionada con el despeje disponible en el interior de dicha curva. Dicho despeje F equivale a la flecha de un arco de circunferencia en el que se verifican las siguientes relaciones geométricas expresadas en las Ecuaciones 40, 41 y 42 (Figura 100).

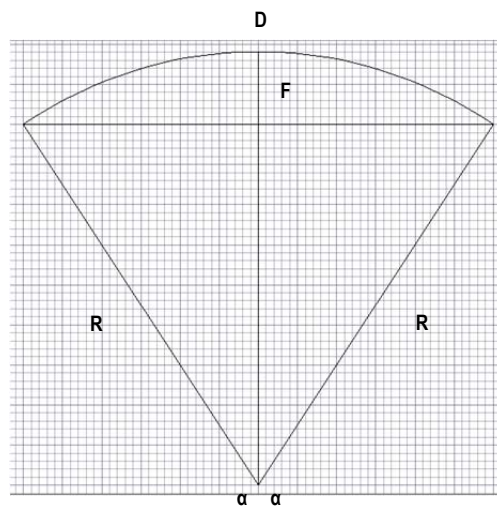


Figura 100: Despeje necesario en curva (F) para garantizar una distancia de visibilidad D (M. Fomento, 2000)

$$R \cdot \cos(\alpha) = R - F \rightarrow \cos(\alpha) = 1 - \frac{F}{R} \quad (40)$$

$$D = 2 \cdot R \cdot \arccos \left(1 - \frac{F}{R} \right) \rightarrow \cos \left(\frac{D}{2R} \right) = 1 - \frac{F}{R} \quad (41)$$

$$F = R - R \cdot \cos \left(\frac{D}{2R} \right) \quad (42)$$

Donde:

D: arco de circunferencia (m)

R: radio de la circunferencia (m)

α : ángulo girado por la circunferencia para el desarrollo circunferencial $D/2$

La línea de referencia escogida por las diferentes guías de diseño, introduce ciertas variaciones sobre las ecuaciones anteriores. Así por ejemplo, la guía de diseño española (M. Fomento, 2000), establece que dicha medición se realice según una línea equidistante del borde exterior de la calzada, un valor igual a 1,5 m (Figura 101-a), mientras que la estadounidense (AASHTO, 2011) establece que en la mayoría de los estudios pueda ser suficiente emplear como línea de referencia el centro de la calzada.

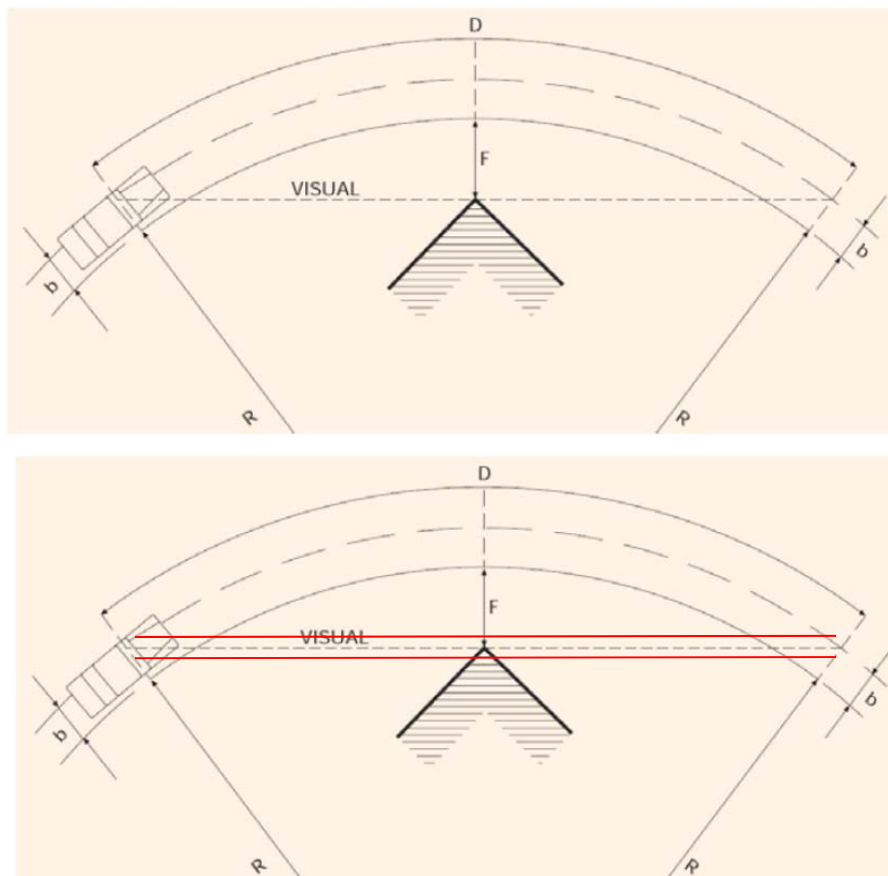


Figura 101: Despeje necesario en curva (F) para garantizar una distancia de visibilidad D (a) (M.Fomento, 2000); Efecto de la anchura de PV (b)

Introduciendo el efecto de la dimensión b (Figura 101-b) y expresando el ángulo en gonios, se llega entonces a la expresión mostrada en la Ecuación 43 (M. Fomento, 2000).

$$F = R - (R + b) \cdot \cos\left(\frac{31,83 \cdot D}{R + b}\right) \quad (43)$$

Donde:

F: distancia mínima del obstáculo al borde de la calzada más próximo a él (m).

R: radio del borde de la calzada más próxima al obstáculo (m).

b: distancia del punto de vista del conductor al borde de la calzada más próximo al obstáculo (m).

D: visibilidad (m)

(valor angular expresado en gonios)

Al considerar la anchura del PV, el despeje necesario para que exista visión resulta ser el despeje inicial F , incrementado en la mitad de la dimensión a .

Con el fin de poner de manifiesto las diferencias entre diferentes guías de diseño, en la Tabla 13 se resumen las distancias de visibilidad de parada requeridas para diferentes velocidades según los criterios de las guías estadounidense (AASHTO, 2011) y española (Ministerio de Fomento, 2000) asignándoles los radios mínimos correspondientes a sus respectivos coeficientes de rozamiento transversal. Para homogeneizar el análisis, en ambos casos se ha considerado como línea de referencia una línea equidistante del borde exterior de la calzada situada hacia el interior de la calzada a 1,50 m de distancia, anchura de carril de 3,50 m, terreno horizontal y peralte del 7%.

Tabla 13: Radios, distancias de visibilidad de parada y despejes asociados a diferentes velocidades según las guías de diseño AASHTO,2011 y M. Fomento, 2000

Velocidad (km/h)	Peralte considerado (%)	Distancia de visibilidad de parada calculada (m)		Radio mínimo (m) según AASHTO, 2011 (calculado)	Radio mínimo (m) según M.Fom, 2000 (tabulado)	Despeje (m) para (1)	Despeje (m) para (2)
		AASHTO, 2011 (1)	M.Fom, 2000 (2)				
20	7	18,5	—	12,6	—	2,29	—
30	7	31,2	—	29,5	—	2,80	—
40	7	46,2	36,8	52,5	50	3,69	1,98
50	7	63,5	51,7	85,6	85	4,46	2,50
60	7	83,0	69,7	128,8	130	5,23	3,21
70	7	104,9	91,2	183,7	190	6,02	4,00
80	7	129,0	116,8	240,0	265	7,19	4,96
90	7	155,5	145,5	318,9	350	7,99	6,07
100	7	184,2	178,6	414,4	485	8,74	6,73
110	7	215,3	216,8	529,3	670	9,45	7,27

Por su parte, en la Tabla 14 pueden observarse las pérdidas de visibilidad para las mismas velocidades y radios provocadas por la consideración de un PV de anchura 0,50 m.

Tabla 14: Distancias de visibilidad de parada y distancia de visibilidad de parada reducida por efecto de un PV de anchura $a=0.50$ m (criterios AASHTO,2011 y M. Fom.,2000)

Velocidad (km/h)	Peralte considerado (%)	Distancia de visibilidad de parada calculada (m)			$a/2$ (a= anchura PV, (m))	Distancia de visibilidad de parada reducida (m)		
		AASHTO, 2011 (1)	M.Fom, 2000 (2)	Despeje (m) para (1)		Despeje (m) para (2)	AASHTO, 2011 (1)	M.Fom, 2000 (2)
20	7	18,5	—	2,29	—	0,25	17,8	—
30	7	31,2	—	2,80	—	0,25	30,3	—
40	7	46,2	36,8	3,69	1,98	0,25	45,1	35,41
50	7	63,5	51,7	4,46	2,50	0,25	62,1	50,02
60	7	83	69,7	5,23	3,21	0,25	81,4	67,73
70	7	104,9	91,2	6,02	4,00	0,25	103,1	88,98
80	7	129	116,8	7,19	4,96	0,25	127,1	114,45
90	7	155,5	145,5	7,99	6,07	0,25	153,4	142,91
100	7	184,2	178,6	8,74	6,73	0,25	181,9	175,68
110	7	215,3	216,8	9,45	7,27	0,25	212,8	213,47

Finalmente, la Tabla 15 muestra las reducciones de visibilidad que generan prismas visuales de anchura variable entre 0,10 y 0,50 m con respecto a la que se obtendría con la tradicional consideración de una línea visual.

Tabla 15: Reducción de las distancias de visibilidad de parada por consideración de diferentes anchuras de PV con respecto a la tradicional línea visual, distancia (a) y porcentaje (b) (criterios AASHTO,2011 Y M.Fom.,2000)

a)

Velocidad (km/h)		Reducción en la distancia de visibilidad de parada (m)											
		Radio mínimo calculado (m)		a = 0,5		a = 0,4		a = 0,3		a = 0,2		a = 0,1	
		AASHTO, 2011	M.Fom, 2000	AASHTO	M.Fom	AASHTO	M.Fom	AASHTO	M.Fom	AASHTO	M.Fom	AASHTO	M.Fom
20	12,6	—	0,66	—	0,53	—	0,39	—	0,26	—	0,13	—	
30	29,5	—	0,94	—	0,75	—	0,56	—	0,37	—	0,19	—	
40	52,5	50,0	1,15	1,39	0,91	1,12	0,68	0,84	0,45	0,57	0,23	0,30	
50	85,6	85,0	1,36	1,70	1,09	1,37	0,81	1,04	0,54	0,70	0,27	0,38	
60	128,8	130,0	1,57	1,95	1,25	1,57	0,94	1,19	0,62	0,81	0,31	0,44	
70	183,7	190,0	1,77	2,19	1,41	1,77	1,06	1,34	0,71	0,92	0,35	0,50	
80	240,0	265,0	1,88	2,40	1,50	1,94	1,13	1,48	0,75	1,02	0,37	0,56	
90	318,9	350,0	2,07	2,56	1,66	2,08	1,24	1,59	0,83	1,10	0,41	0,62	
100	414,4	485,0	2,27	2,91	1,82	2,36	1,36	1,81	0,91	1,26	0,45	0,71	
110	529,3	670,0	2,48	3,32	1,98	2,69	1,48	2,07	0,99	1,44	0,49	0,82	

b)

Velocidad (km/h)		Reducción en la distancia de visibilidad de parada (%)											
		Radio mínimo calculado (m)		a = 0,5		a = 0,4		a = 0,3		a = 0,2		a = 0,1	
		AASHTO, 2011	M.Fom, 2000	AASHTO	M.Fom	AASHTO	M.Fom	AASHTO	M.Fom	AASHTO	M.Fom	AASHTO	M.Fom
20	12,6	—	3,58	—	2,85	—	2,13	—	1,42	—	0,71	—	
30	29,5	—	3,03	—	2,41	—	1,81	—	1,20	—	0,60	—	
40	52,5	50	2,48	3,79	1,98	3,04	1,48	2,29	0,98	1,56	0,49	0,82	
50	85,6	85	2,15	3,29	1,71	2,65	1,28	2,00	0,85	1,36	0,43	0,73	
60	128,8	130	1,89	2,80	1,51	2,25	1,13	1,71	0,75	1,17	0,38	0,63	
70	183,7	190	1,69	2,40	1,35	1,94	1,01	1,47	0,67	1,01	0,34	0,55	
80	240,0	265	1,46	2,05	1,16	1,66	0,87	1,27	0,58	0,87	0,29	0,48	
90	318,9	350	1,33	1,76	1,06	1,43	0,80	1,09	0,53	0,76	0,27	0,43	
100	414,4	485	1,23	1,63	0,99	1,32	0,74	1,01	0,49	0,70	0,25	0,40	
110	529,3	670	1,15	1,53	0,92	1,24	0,69	0,95	0,46	0,67	0,23	0,38	

La variación producida, se sitúa entre el 3,58% correspondiente a una velocidad de 20 km/h (18,5 m de distancia de visibilidad según criterio AASHTO 2011 para terreno horizontal) y una anchura de PV de 0,50 m, y el 0,23% correspondiente a 110 km/h y 0,10 m de anchura de PV (215,3 y 216,8 m de distancia de visibilidad calculada para terreno horizontal según criterio AASHTO 2011 y M. Fomento 2000 respectivamente).

Estos resultados ponen de manifiesto que, a pesar de las diferencias en la identificación del obstáculo analizadas con anterioridad, la consideración de la anchura del prisma visual tiene un efecto reducido sobre la distancia de visibilidad de parada disponible resultante.

De acuerdo con estos resultados, el análisis que se expone en los apartados siguientes se centra, por tanto, en el hecho de que una visual pueda penetrar a través de un obstáculo opaco por insuficiente densidad de la nube de puntos para las dimensiones consideradas de PV y UPR.

Para ello, se analizan visuales trazadas desde múltiples puntos de observación y con distintos ángulos de incidencia con el talud, para diferentes dimensiones de prisma

visual y unidad prismática rectangular. Este análisis se lleva a cabo para cada una de las dos muestras analizadas, tanto en la carretera CP-29-25, con datos procedentes del equipo de mayor frecuencia, como en la carretera CV-35, con datos de densidad de nube de puntos inferior.

Resultados procedentes del sistema de mayor frecuencia: Carretera CP-29-25

Cada una de las visuales sometidas a estudio se ha trazado entre dos puntos observador y objetivo situados sobre la calzada. Las posiciones y alturas de dichos puntos se mantienen constantes en todos los casos de modo que no se constituyan en variables del análisis. Ambos se sitúan sobre la línea de referencia (línea blanca de separación de sentidos de circulación), a alturas de 1,08 m y 0,60 m, respectivamente, de acuerdo con los criterios AASHTO 2011.

El tramo analizado está constituido por una curva a izquierdas de 136 m de radio que dispone de un talud de desmonte en roca situado en su parte interior (Figura 102).

La limitación a la visión resulta en este caso evidente, por lo que las visuales trazadas contra el talud deben arrojar un resultado negativo de visión lo que es considerado “éxito” para ese resultado. Por el contrario, una falsa penetración de la visual a través del talud se registra como un “fracaso” para ese resultado. El análisis concluirá con las tasas de éxito o fracaso obtenidas para diferentes frecuencias de escaneo LiDAR y para diferentes valores de anchura de PV y de altura de UPR.



Figura 102: Caso analizado: desmonte en el interior de una curva en la carretera CP-29-25.

En este análisis se han establecido cuatro puntos de observación situados sobre el eje y distanciados entre sí 5,0 m. Desde cada uno de ellos, se han radiado 10 visuales hasta otros tantos puntos objetivo también situados sobre el eje a una distancia tal que se produzca intersección con el talud en puntos diversos y con ángulos de incidencia en el talud variables (Figura 103).

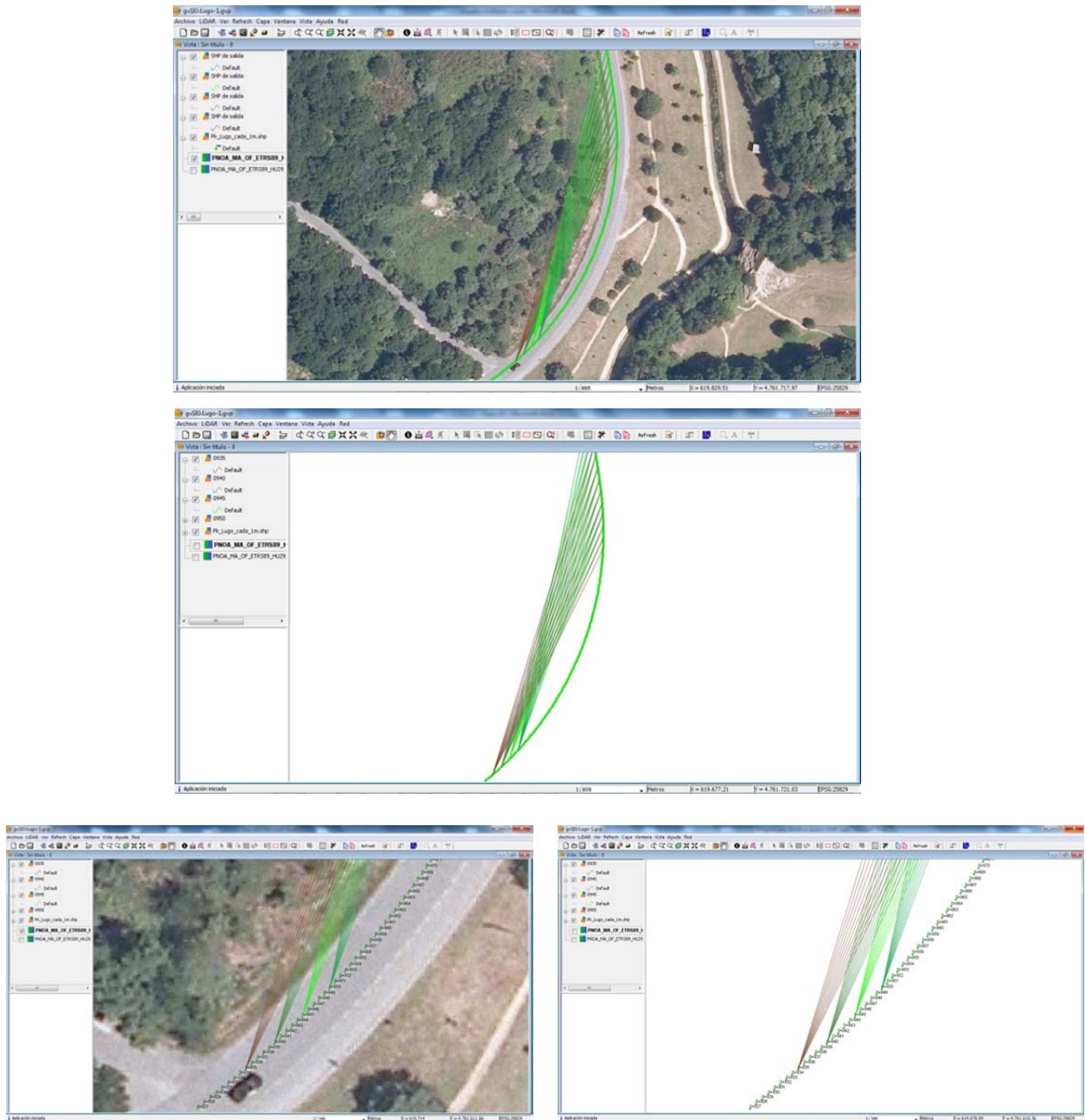


Figura 103: Puntos de observación y visuales radiadas desde ellos con intersección en el talud de desmonte. Carretera CP-29-25 (GvSIG).

Los puntos kilométricos de observación son el 0+935, 0+940, 0+945 y 0+950 en sentido directo. Los 10 puntos objetivo consideradas desde cada punto de observación, se encuentran equidistantes entre sí 5,0 m.

En la Figura 104 pueden observarse, desde diferentes perspectivas y con la nube de puntos LiDAR visible, tanto las características del tramo, como de la visual trazada desde el observador y su intersección con el talud.

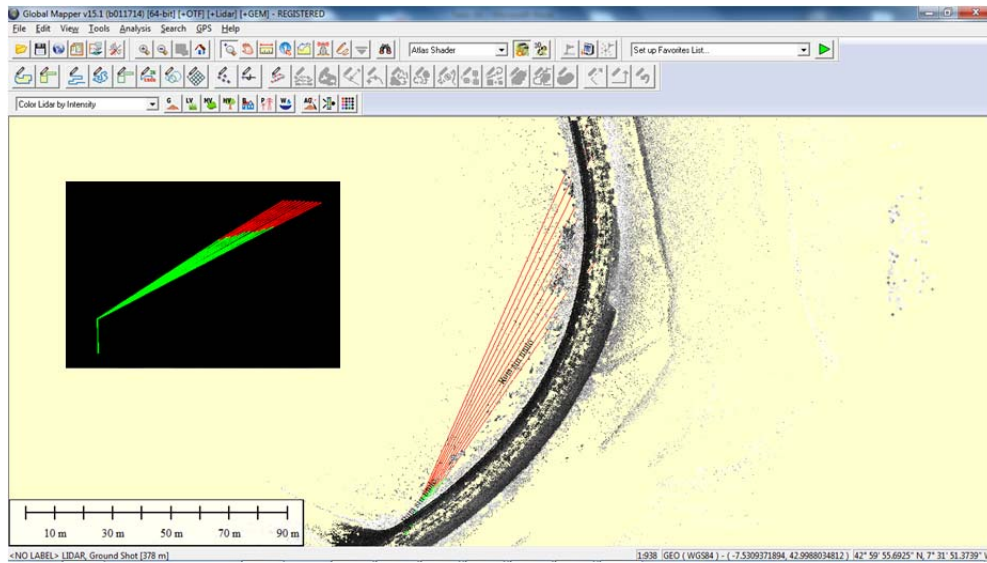
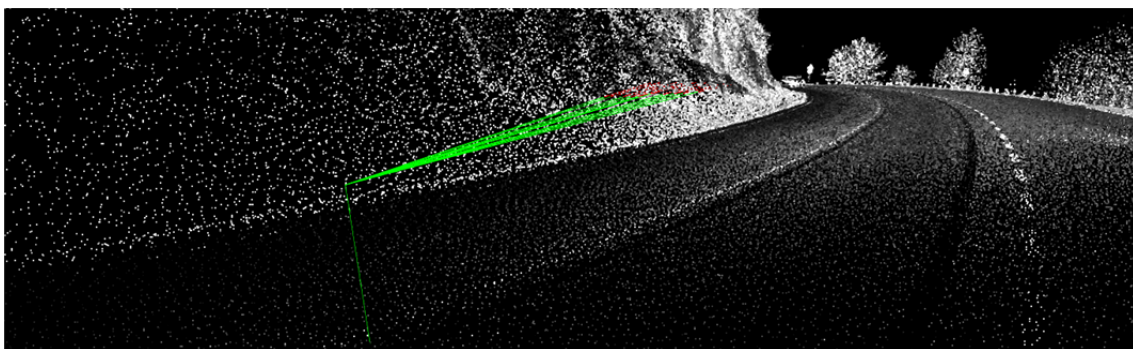


Figura 104. Ejemplo de punto de observación y visuales radiadas desde él con intersección en el talud de desmonte. Vista en planta (Global Mapper trial versión) y en tres dimensiones (Nasa World Wind).

El tipo de equipo de gran frecuencia empleado en este caso permite el análisis de resultados para las densidades D1 a D4 consideradas.

Para el conjunto de las 10 visuales trazadas, la combinación de las densidades D1 a D4, anchuras de PV $a = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ y $0,5$ y alturas de UPR $b = 0,03; 0,05; 0,07$ y $0,10$, arroja un total de 3.200 observaciones para este caso.

Para facilitar la interpretación y validación, los resultados son también visualizados en tres dimensiones (Figura 105):



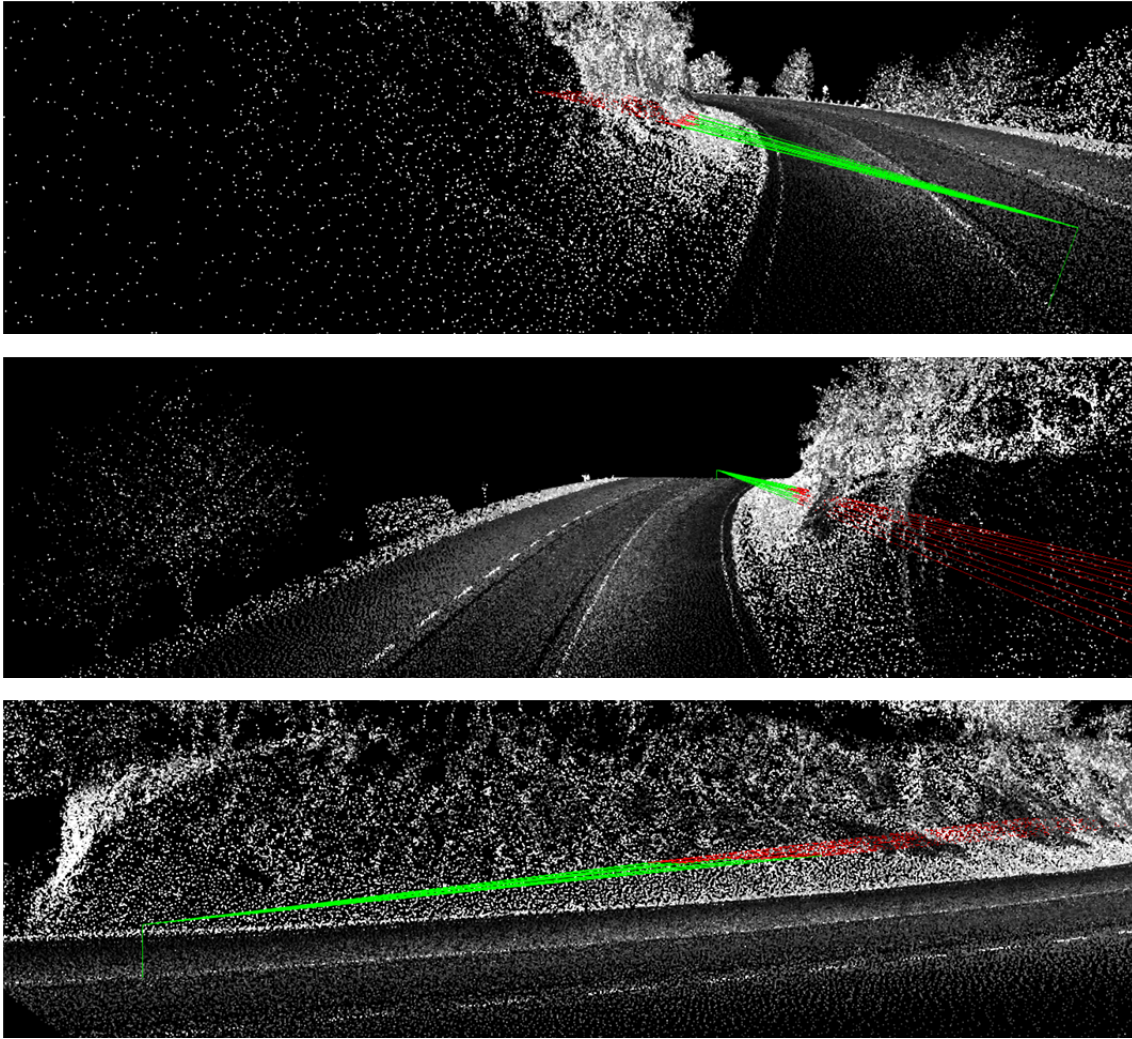


Figura 105: Desmorte en el interior de una curva en la carretera CP-29-25. Diferentes perspectivas obtenidas de las visuales y de la nube de puntos LiDAR (Nasa World Wind).

Para simplificar el proceso de análisis, el algoritmo desarrollado identifica como coordenadas del obstáculo a la visión las correspondientes al centro de gravedad de la primera UPR en la que se localiza algún punto LiDAR en su interior.

La identificación de las visuales que penetran en el talud se lleva a cabo mediante un triple procedimiento de comprobación:

- representación conjunta en gráfico 3D de las coordenadas de los centros de las UPR identificadas como obstáculo
- representación de las distancias entre observador y obstáculo
- representación coloreada de las visuales (color verde hasta el punto obstáculo y color rojo desde el obstáculo hasta el punto objetivo)

La representación conjunta 3D de los puntos obstáculo localizados para cada visual, ha sido además coloreada atendiendo a los diferentes parámetros implicados en el

resultado, esto es, densidad de la nube de puntos, anchura del PV y altura de la UPR. A modo de ejemplo, en las Figuras 106, 107 y 108 pueden observarse los gráficos obtenidos para la primera visual del primero de los puntos de observación (PK 0+935, Visual 1).

Densidad: D1 D2 D3 D4

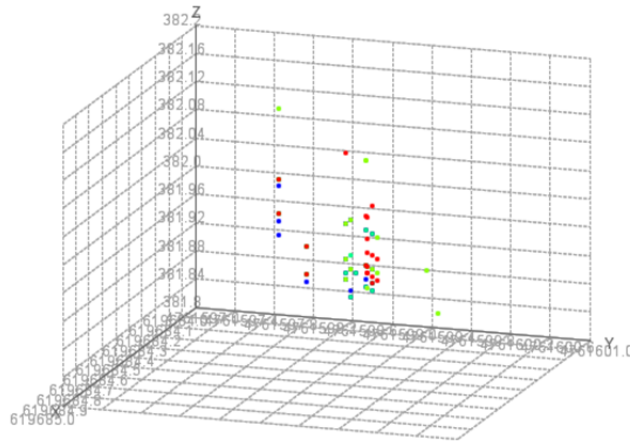


Figura 106: Puntos obstáculo identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D coloreados atendiendo al tipo de densidad de muestra D. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)

Resolution_Meters 0.100 0.500

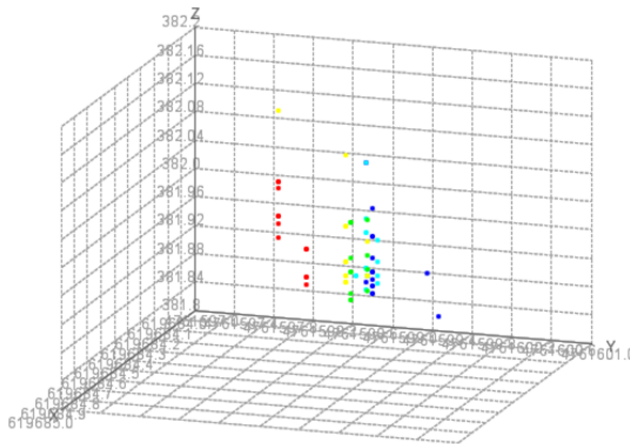


Figura 107: Puntos obstáculo identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D coloreados atendiendo al valor de anchura de PV. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)

ResolutionZ_Meters

0.030  0.100

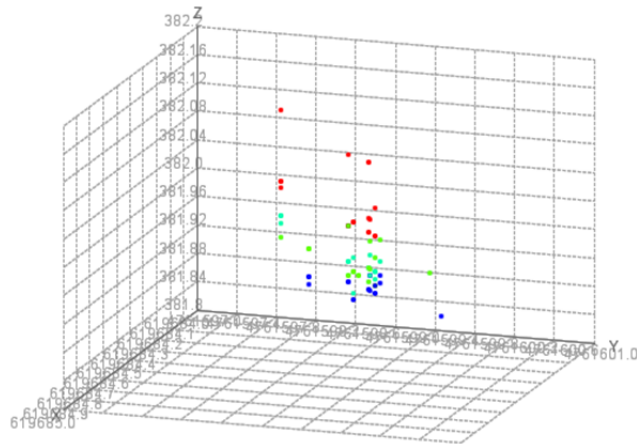


Figura 108: Puntos obstáculo identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D coloreados atendiendo al valor de altura de la UPR. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)

Este tipo de representación permite identificar penetraciones de las visuales en el talud. En caso de penetración, los puntos quedan sensiblemente distanciados entre sí, pudiendo analizarse tanto el número de resultados que han provocado el fracaso del sistema, así como la densidad, anchura de PV y altura de UPR a la que pertenecen (Figuras 109, 110 y 111).

Densidad 

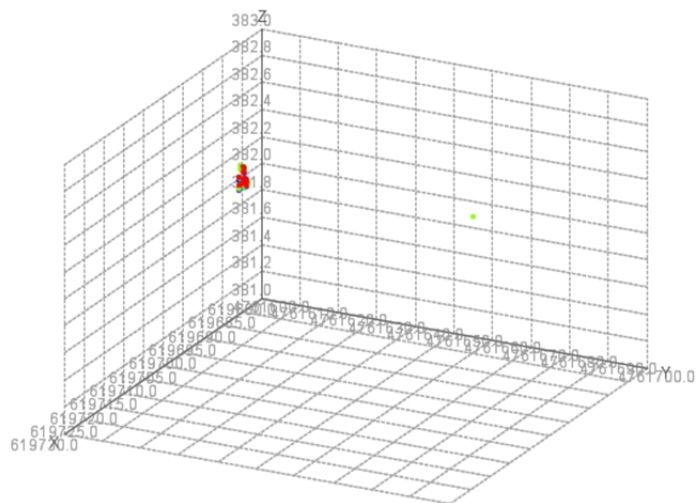


Figura 109: Ejemplo de resultados para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por Densidad. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4)

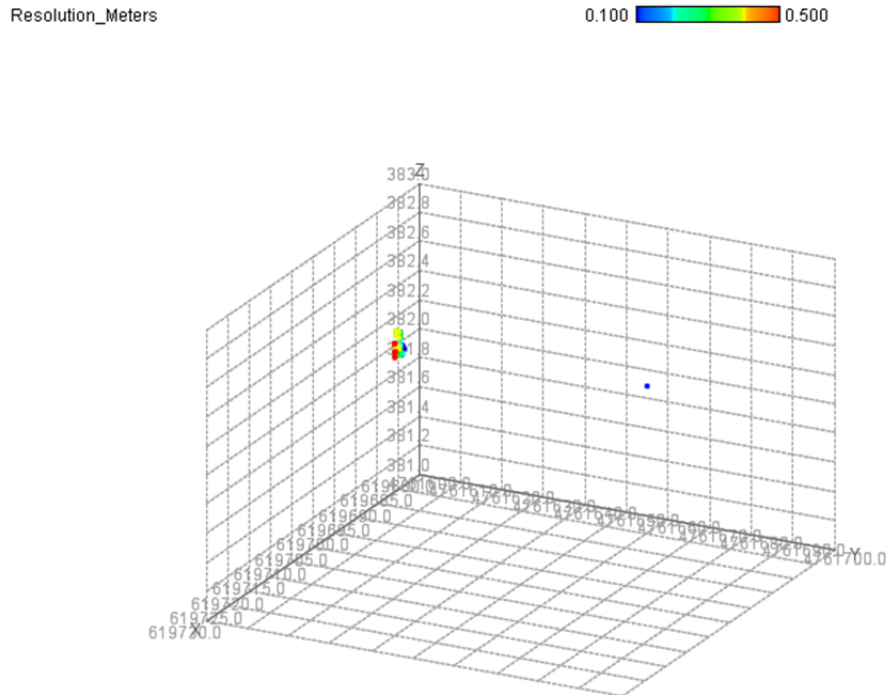


Figura 110: Ejemplo de resultados para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por anchura de PV. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4)

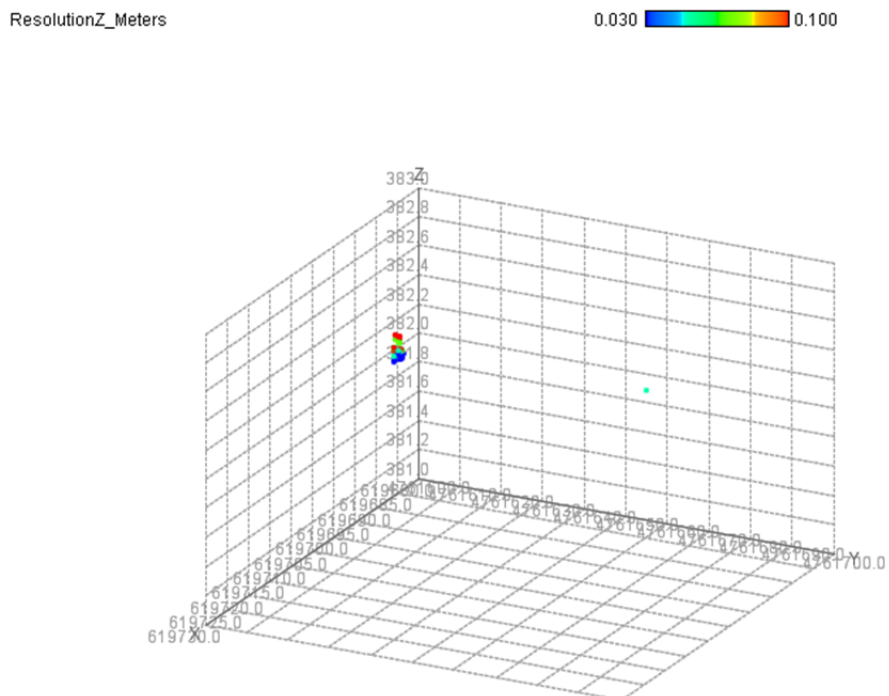


Figura 111: Ejemplo de resultados para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por altura de UPR. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4)

Por otro lado, la representación de las distancias entre observador y obstáculo permite también una rápida identificación de las visuales que han sufrido penetración en el talud. En este caso, los colores empleados para representar cada uno de los 80 resultados obtenidos en cada visual, también identifican la combinación de densidad, anchura de PV y altura de UPR para las cuáles se produce dicha penetración.

En las Figuras 112, 113 y 114 se muestran a modo de ejemplo algunos de los gráficos obtenidos cuando no existe penetración de la visual.

Tal y como se analizó de forma teórica, en estos gráficos se ponen de manifiesto las diferentes distancias al observador registradas como obstáculo para cada visual en función de la densidad de puntos de la muestra y de las dimensiones del PV y de la UPR.

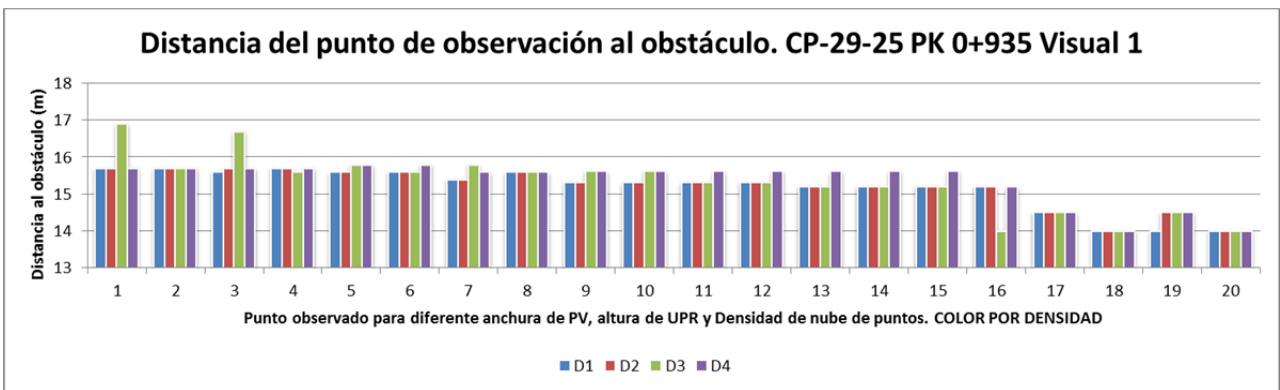


Figura 112: Distancia de los puntos de observación a los obstáculos identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D. Color según densidad de la muestra. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)

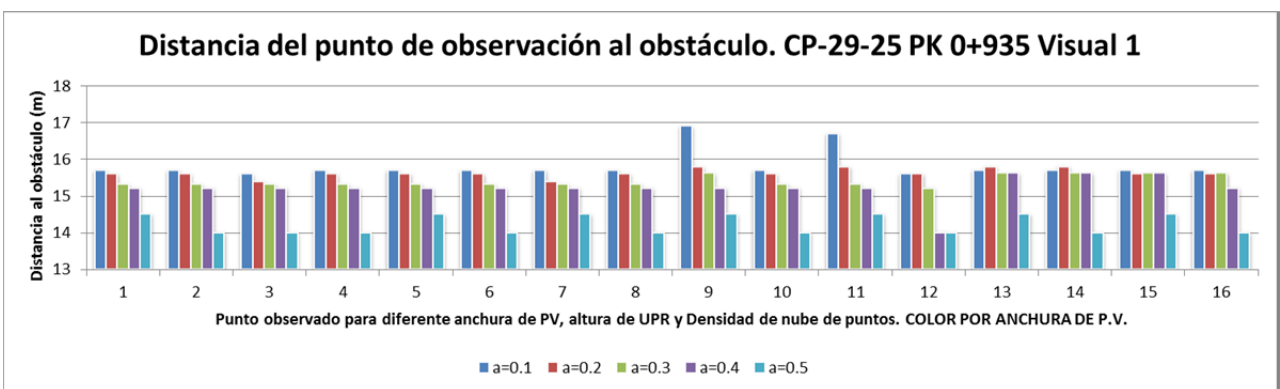


Figura 113: Distancia de los puntos de observación a los obstáculos identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D. Color según anchura del PV. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)

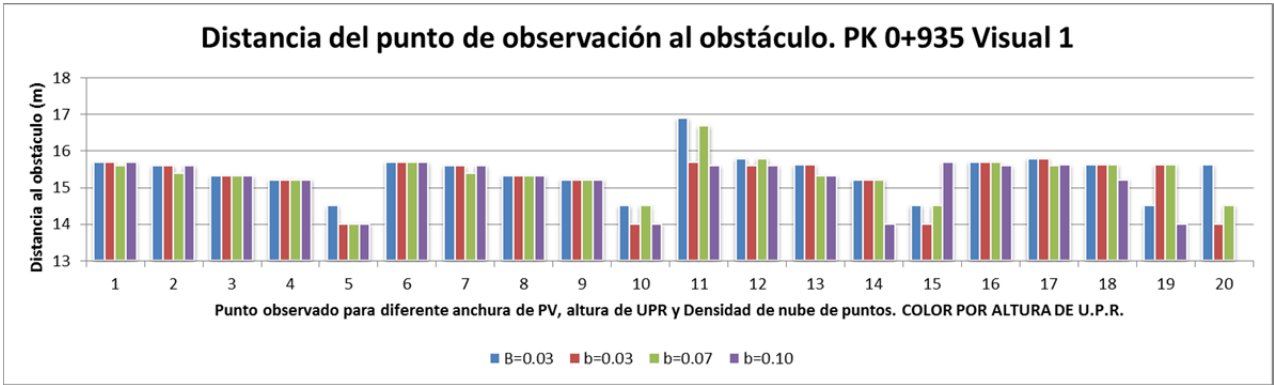


Figura 114: Distancia de los puntos de observación a los obstáculos identificados para diferentes combinaciones de PV, UPR y D. Color según altura de la UPR. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 1)

Quando se produce una penetración de la visual en el talud, la distancia entre el observador y el obstáculo registra un valor puntual sensiblemente superior al correspondiente al resto de casos (Figuras 115, 116 y 117).

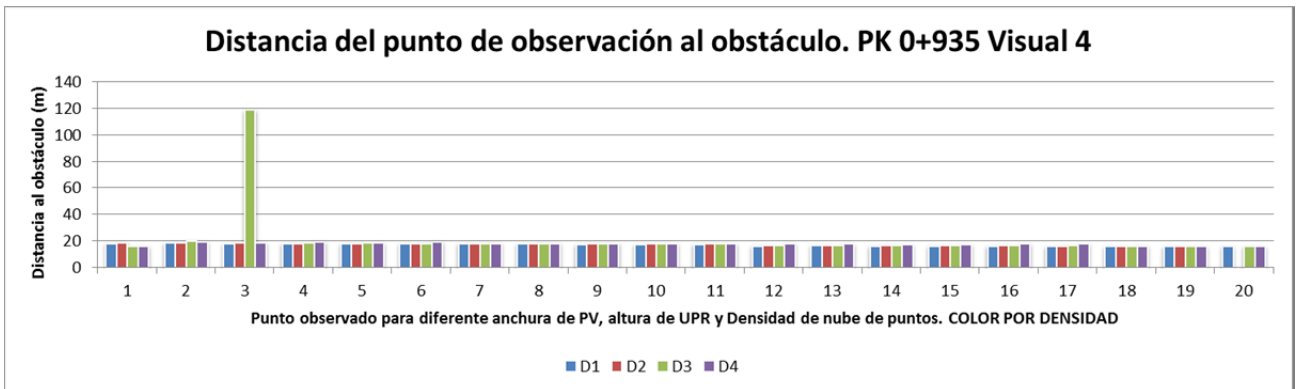


Figura 115: Ejemplo de resultados de distancia entre observador y obstáculo para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por Densidad. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4)

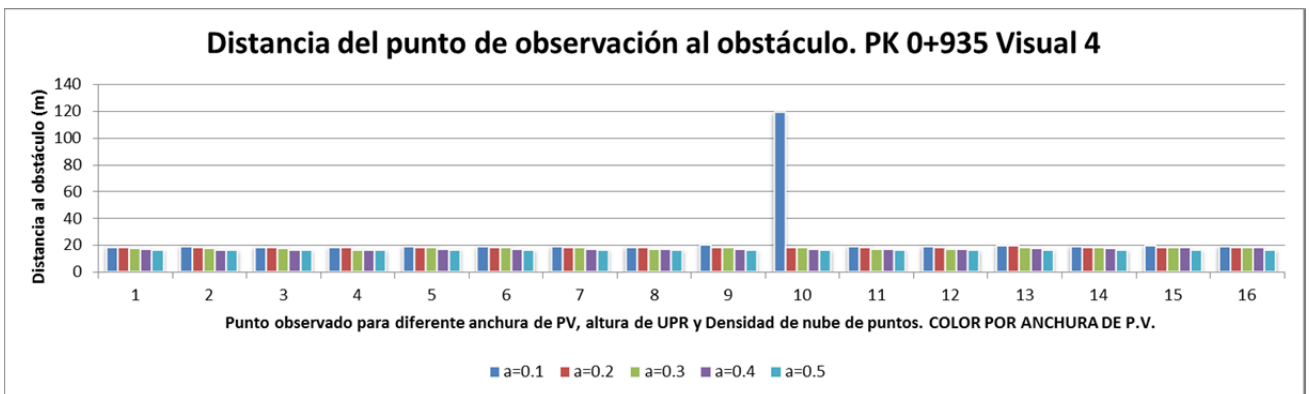


Figura 116: Ejemplo de resultados de distancia entre observador y obstáculo para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por anchura de PV. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4)

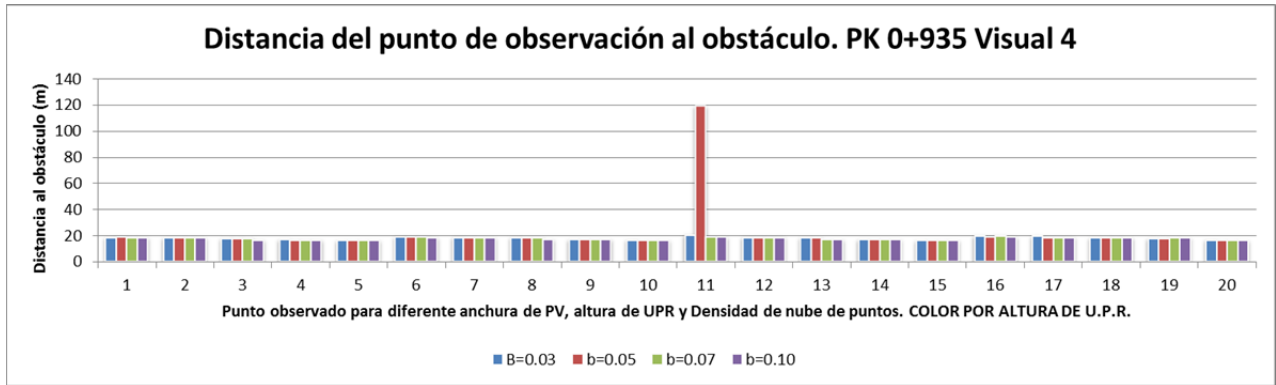


Figura 117: Ejemplo de resultados de distancia entre observador y obstáculo para diferentes valores de densidad, anchura de PV y altura de UPR con una penetración en el talud. Color por altura de UPR. (Carretera CP-29-25. PK 0+935, Visual 4)

En la Figura 118 puede observarse la penetración de la visual en el talud para uno de los casos analizados en comparación con otras combinaciones de anchura y altura de UPR que sí identifican al talud como un obstáculo a la visión.

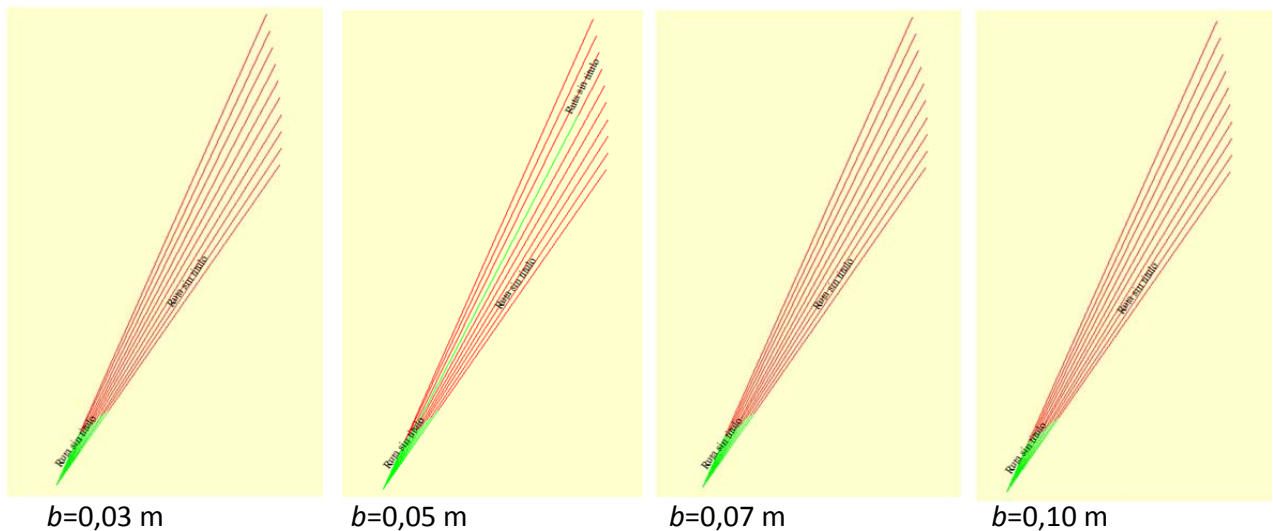


Figura 118: Ejemplo de visuales obtenidas en la Carretera CP-29-25. PK 0+935, Densidad=D3, con $\alpha=0,10$ m y b variable, con un caso de penetración en el talud ($b=0,05$ m) (Globalmapper, trial version).

La representación tridimensional conjunta de las visuales y de la nube de puntos permite asimismo la interpretación y validación del resultado y la confirmación de la existencia o no de penetraciones de visual (Figura 119).

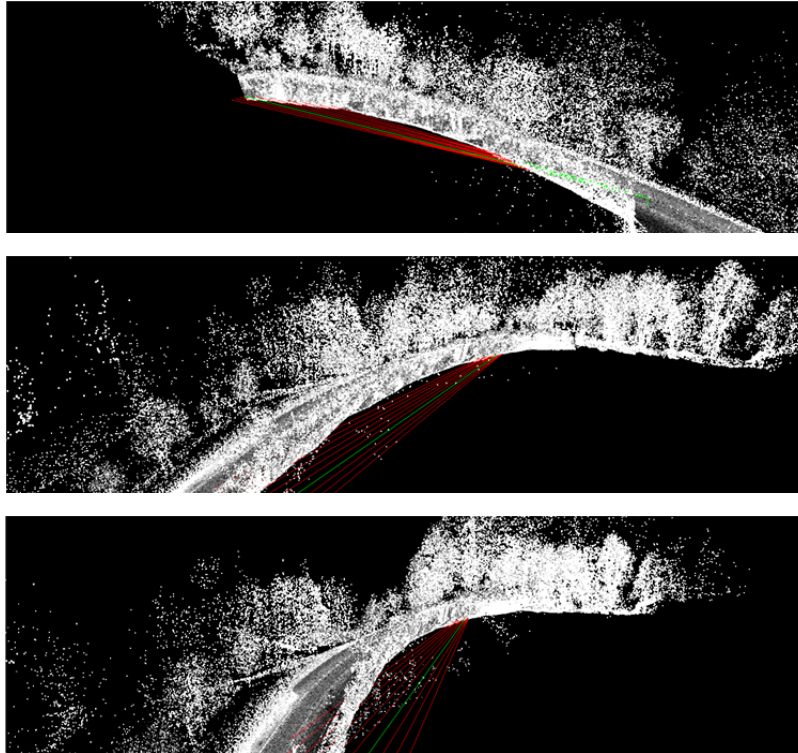
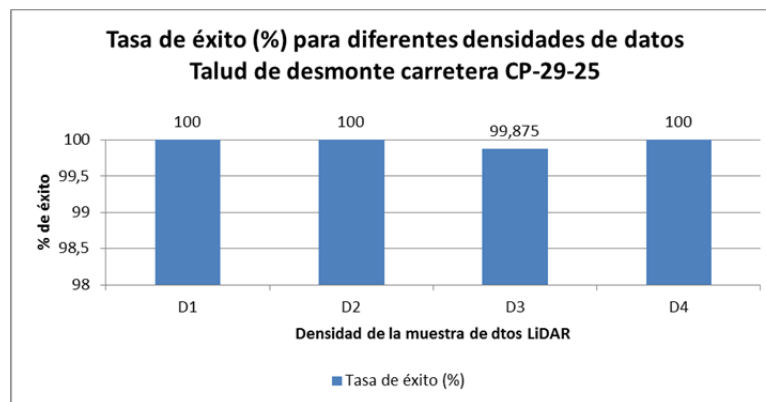


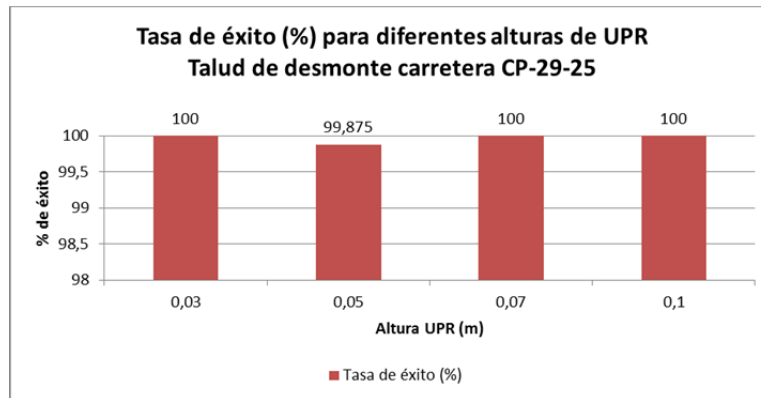
Figura 119: Ejemplo de visuales obtenidas en la Carretera CP-29-25. PK 0+935, Densidad=D3, $\alpha=0,10$ m y b variable, con un caso de penetración en el talud ($b=0,05$ m) (Nasa World Wind).

De acuerdo con las representaciones anteriores, la tasa de éxito, establecida como el porcentaje de observaciones en que se ha producido una correcta identificación del obstáculo a la visión, puede ser determinada en cada caso para todas las combinaciones de densidad, anchura de PV y altura de UPR (Figura 120).

a)



b)



c)

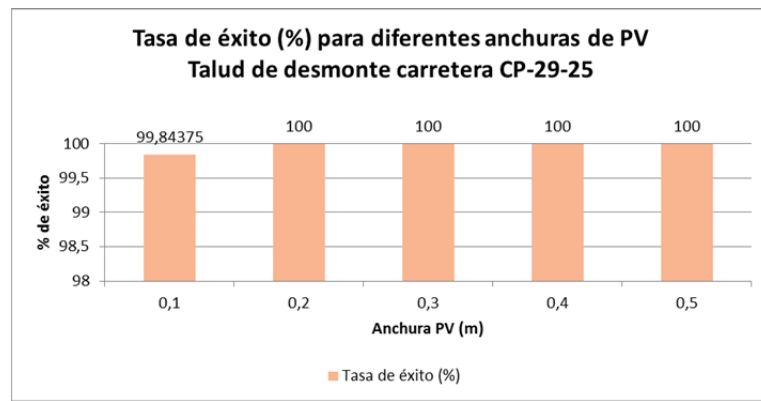


Figura 120: Talud de desmorte. Tasas de éxito para diferentes densidades, alturas de UPR y anchuras de PV (a, b y c respectivamente). Carretera CP-29-25

Datos procedentes del sistema de menor frecuencia: Carretera CV-35

Coherentemente con el procedimiento establecido, cada una de las visuales que son sometidas a estudio se han trazado de nuevo entre dos puntos observador y objetivo situados sobre la calzada. Las posiciones y alturas de dichos puntos se mantienen asimismo constantes en todos los casos de modo que no se constituyan en variables del análisis. Ambos se sitúan sobre la línea de referencia (línea blanca de separación de sentidos de circulación), a alturas de 1,08 m y 0,60 m, respectivamente, de acuerdo con los criterios AASHTO 2011.

El tramo analizado está constituido por una curva a izquierdas de 192 m de radio que dispone de un talud de desmorte en tierras situado en su parte interior (Figura 121).

La limitación a la visión resulta también en este caso evidente, por lo que las visuales trazadas contra el talud deben arrojar un resultado negativo de visión, lo que es considerado “éxito” para ese resultado. Por el contrario, una falsa penetración de la visual a través del talud se registra como un “fracaso” para ese resultado. Al igual que en el caso anterior, el objetivo es determinar las tasas de éxito o fracaso resultantes para diferentes

frecuencias de escaneado LiDAR y para diferentes valores de anchura de PV y de altura de UPR.



Figura 121: Caso analizado: desmonte en el interior de una curva en la carretera CV-35.

En este análisis se ha establecido un punto de observación situado sobre el eje en el punto kilométrico de referencia 5+350 desde el que se han radiado 10 visuales en sentido inverso hasta otros tantos puntos objetivo que se encuentran también situados sobre el eje equidistantes entre sí 5,0 m y a una distancia tal que se produzca intersección con el talud en puntos diversos y con ángulos de incidencia en el talud variables (Figura 122).

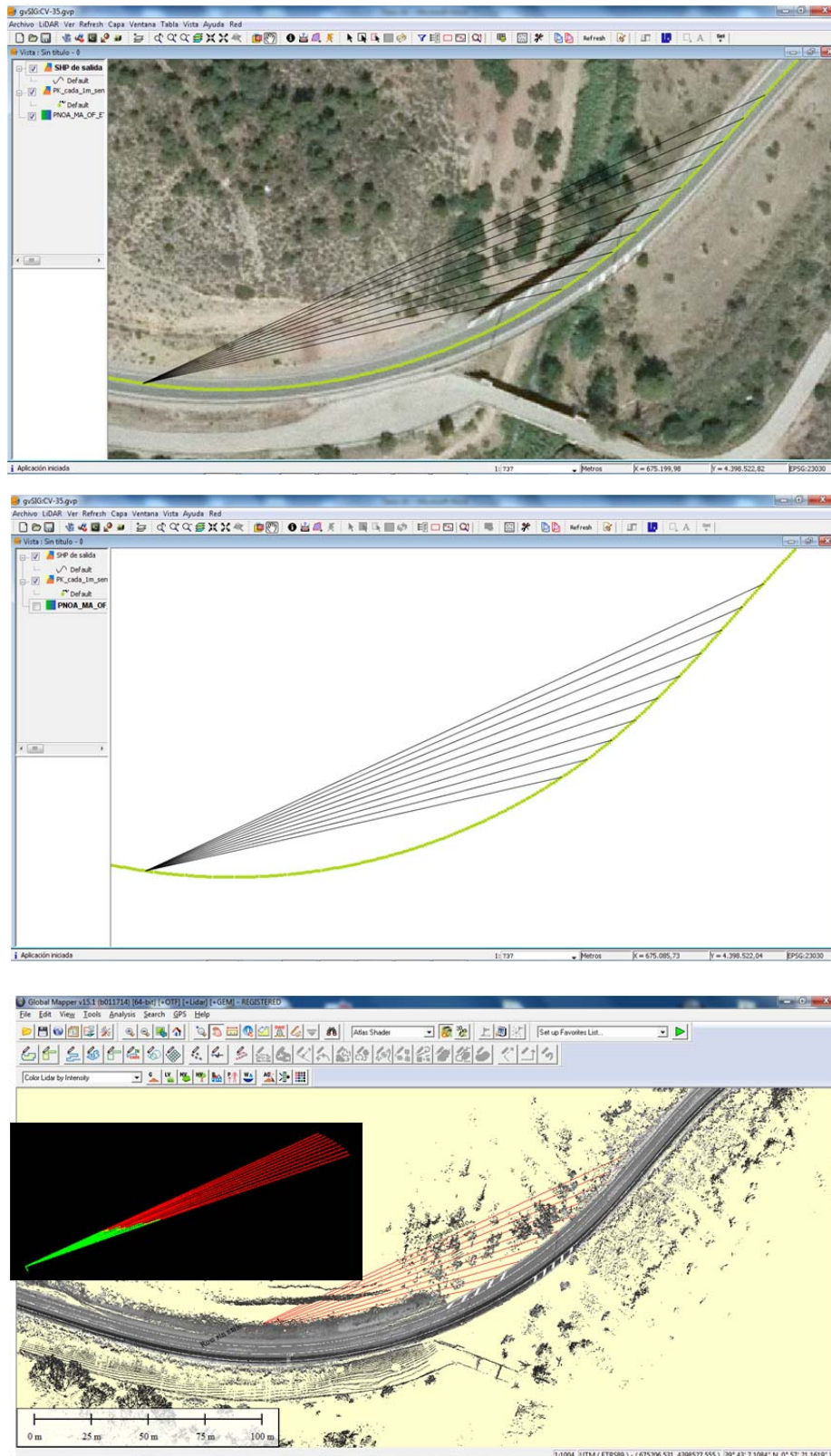


Figura 122: Punto de observación y visuales radiadas desde él con intersección en el talud de desmorte en la carretera CV-35 (GvSIG, Globalmapper y Nasa World Wind).

La frecuencia del equipo empleado en este caso, se considera cota inferior de los actuales sistemas Lidar Mobile presentes en el mercado, por lo que la muestra de datos ha sido empleada directamente sin ningún tipo de modificación sobre la densidad resultante.

Para facilitar la interpretación y la validación de resultados, la aplicación Nasa World Wind ha sido empleada para el testeo de los resultados en tres dimensiones (Figura 123).

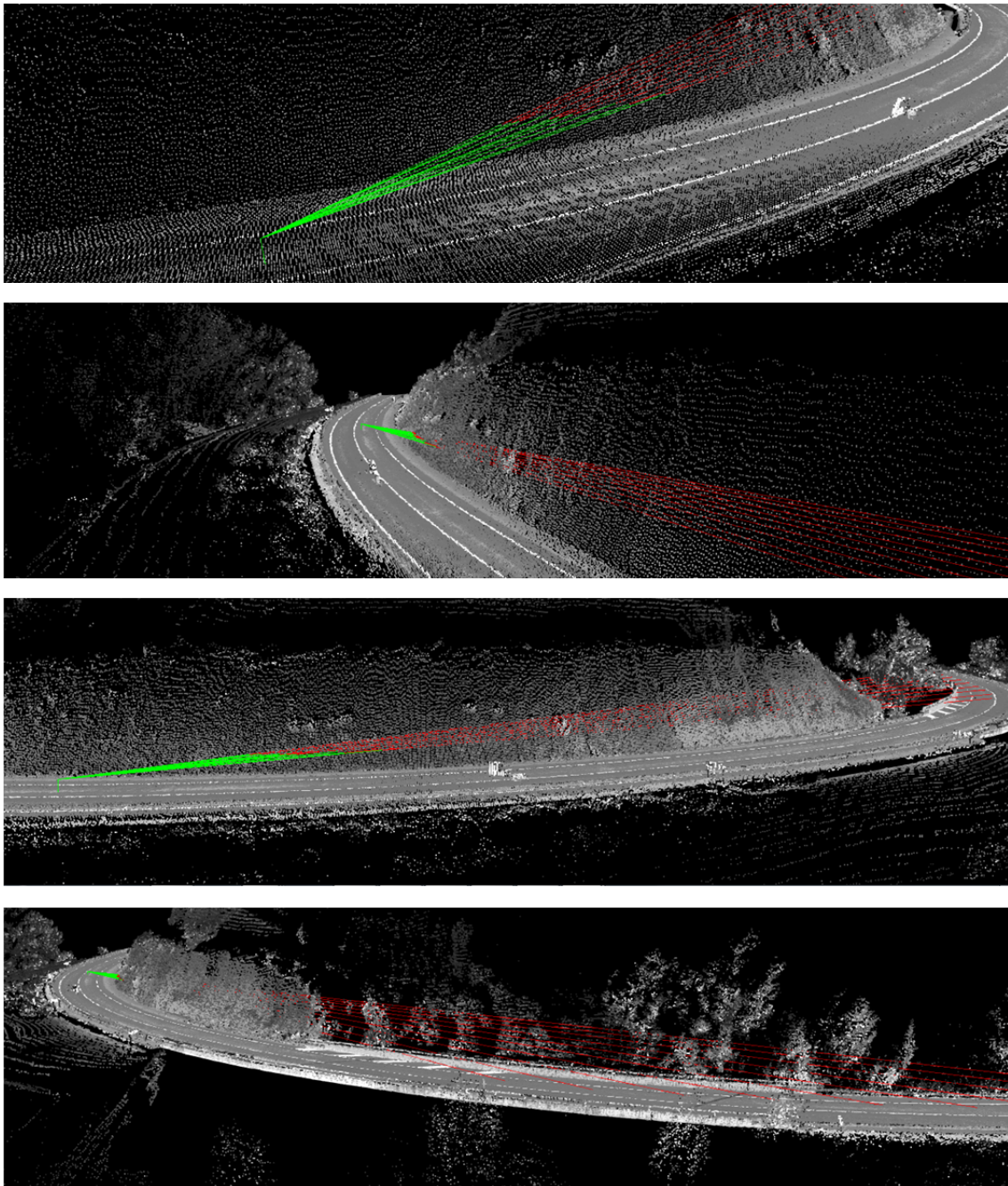


Figura 123: Desmonte en el interior de una curva. Diferentes perspectivas obtenidas de la vista tridimensional de las visuales y de la nube de puntos LiDAR (Carretera CV-35).

Las anchuras y alturas de PV y de UPR consideradas toman valores de 0,1 m; 0,2 m; 0,3 m; 0,4 m; y 0,5 m; y de 0,03 m; 0,05 m; 0,07 m; y 0,10 m, respectivamente, manteniéndose la densidad de la muestra constante e igual a la original, lo que supone un total de 200 observaciones para este caso.

En este caso, la identificación de las visuales que penetran en el talud se lleva a cabo también mediante el triple procedimiento de comprobación:

- representación conjunta en gráfico 3D de las coordenadas de los centros de las UPR identificadas como obstáculo
- representación de las distancias entre observador y obstáculo
- representación coloreada de las visuales (color verde hasta el punto obstáculo y color rojo desde el obstáculo hasta el punto objetivo)

A modo de ejemplo, en las Figuras 124 y 125 puede observarse en planta y vista tridimensional, el caso de varias penetraciones en el talud de la visión localizadas mediante este análisis.

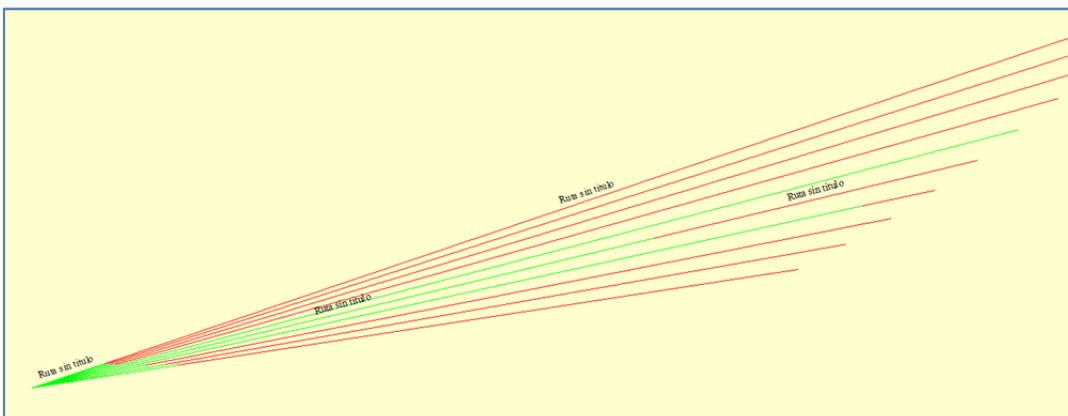


Figura 124: Vista en planta de algunas visuales con penetración en el talud. Carretera CV-35 (Globalmapper trial versión).

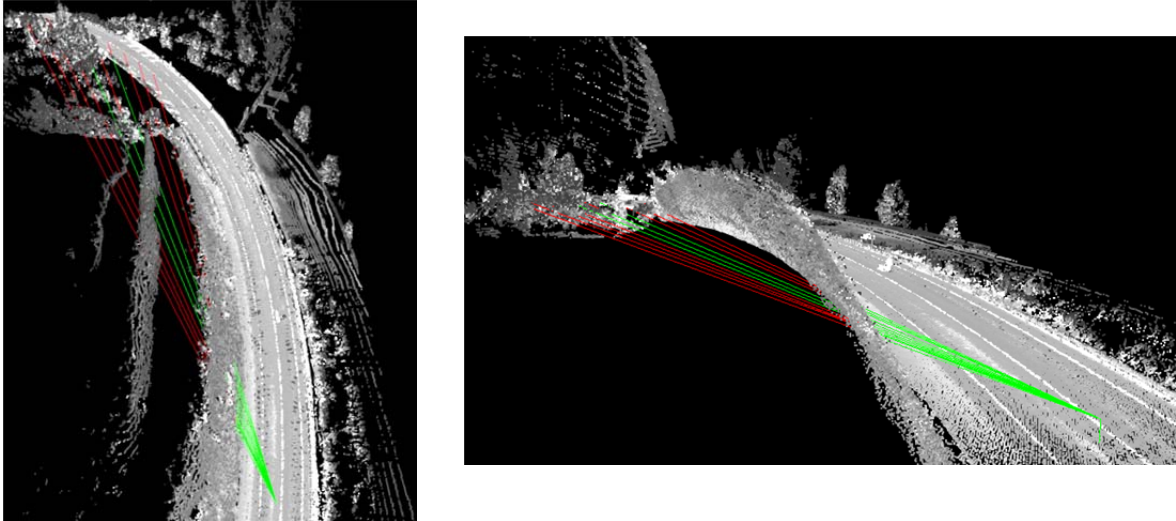


Figura 125: Vista tridimensional de algunas visuales con penetración en el talud. Carretera CV-35 (Nasa World Wind).

La tasa de éxito obtenida en este caso queda representada en las Figuras 126 y 127 para las diferentes dimensiones del PV y de la UPR. Puede observarse que en este caso las tasas de éxito se han reducido en relación a las obtenidas para la carretera CP-29-25 que disponía de mayores densidades de puntos, reflejando un éxito menor para las menores dimensiones del PV y de la UPR.

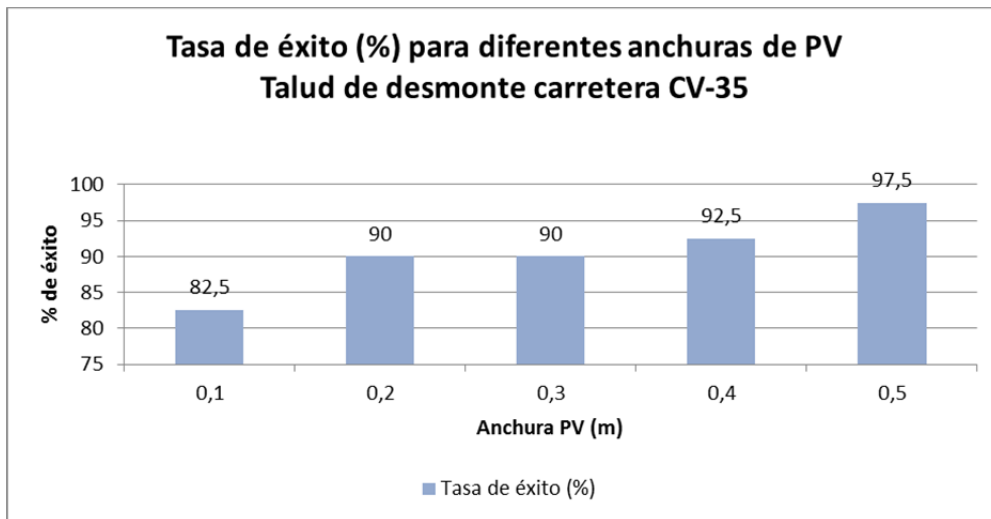


Figura 126: Talud de desmonte. Tasas de éxito para diferentes anchuras de PV. Carretera CV-35

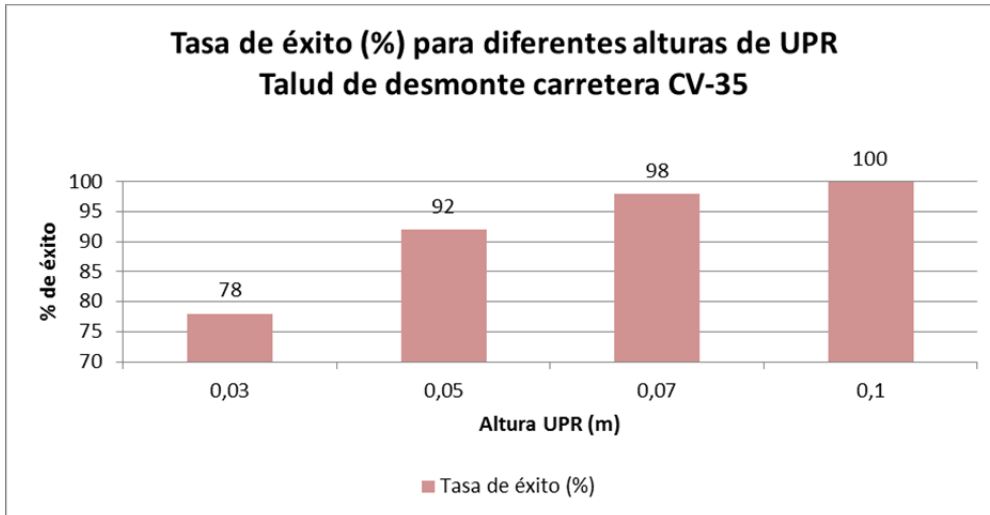


Figura 127: Talud de desmonte. Tasas de éxito para diferentes alturas de UPR. Carretera CV-35

La tasa de éxito correspondiente a cada combinación de anchura de PV y altura de UPR permite asimismo deducir las dimensiones que mejores tasas de éxito arrojan en caso de densidades de nubes de puntos obtenidas con la frecuencia de escaneado de la muestra (Tabla 16).

Tabla 16: Talud de desmonte. Tasas de éxito para diferentes anchuras de PV y alturas de UPR. Carretera CV-35

Talud de desmonte		Tasa de éxito (%)				
CV-35		Anchura de PV (m)				
PK 5+350	Altura UPR (m)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
	0,03	70	80	60	70	80
	0,05	80	90	100	90	100
	0,07	80	90	100	100	100
	0,1	100	100	100	100	100

4.6.1.2 Caso 2: Limitación de visión por presencia de vegetación en el interior de una curva

La presencia de vegetación de los márgenes en el interior de las curvas constituye asimismo un motivo común de reducción de visibilidad en carreteras.

Dada la diferente génesis de la superficie de rebote de los haces láser con respecto a la superficie de un talud de excavación, esta casuística ha sido también sometida a análisis. El caso estudiado corresponde a la carretera CP-29-25 de modo que sea posible extender el estudio a las diferentes densidades generadas a partir de la muestra inicial.

Como en los casos anteriores, cada una de las visuales analizadas se ha trazado entre los puntos observador y objetivo de acuerdo con las especificaciones AASHTO 2011.

El tramo analizado está constituido por una curva a izquierdas de 154,5 m de radio que dispone de vegetación densa situada en su parte interior (Figura 128).



Figura 128: Caso analizado: vegetación en el interior de una curva en la carretera CP-29-25.

En este caso, el punto de observación se encuentra situado sobre el eje de referencia en el punto kilométrico 0+330 con 10 visuales radiadas hacia hasta otros tantos puntos objetivo también situados sobre el eje, equidistantes entre sí 5,0 m (Figuras 129 y 130).

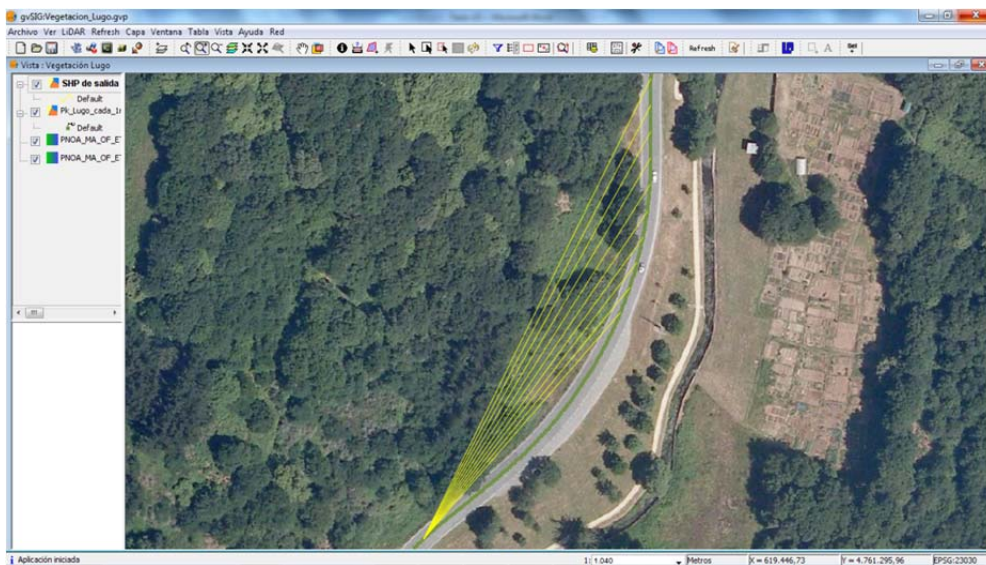


Figura 129: Visuales radiadas para el caso de vegetación en el interior de una curva. Carretera CP-29-25 (GvSIG).

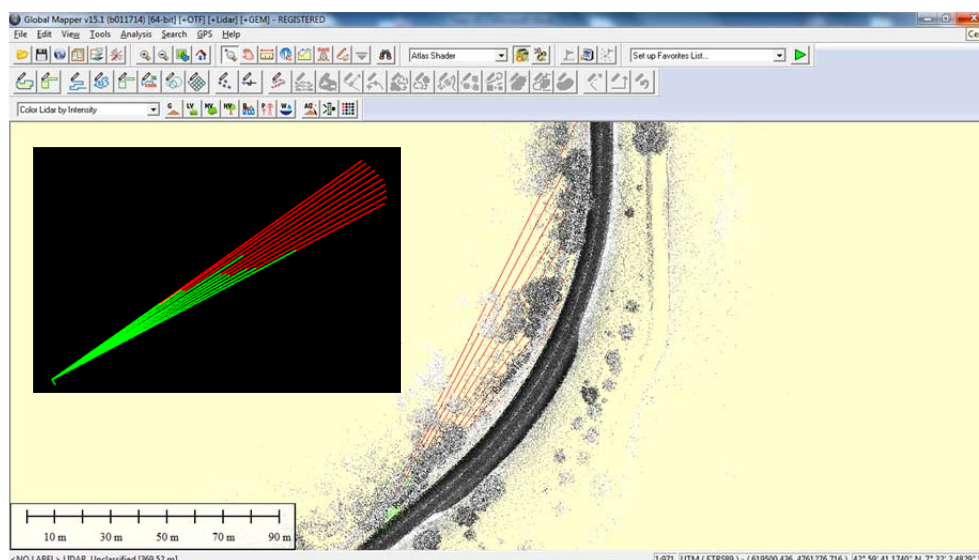
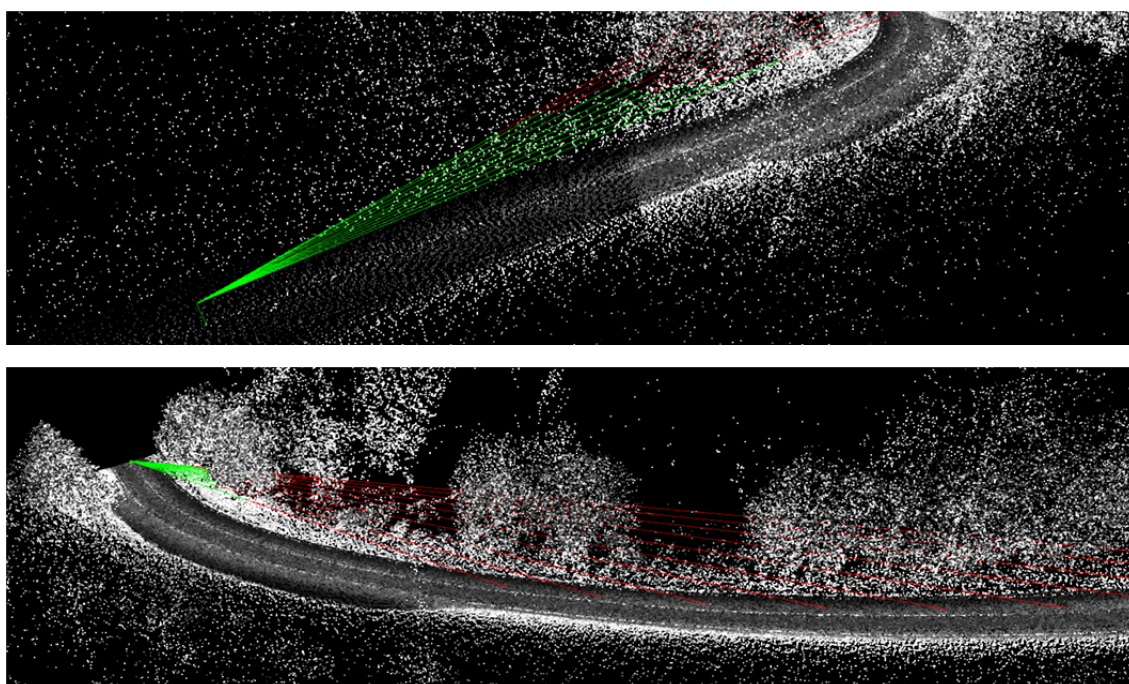


Figura 130: Visuales y nube de puntos para el caso de vegetación en el interior de una curva. Carretera CP-29-25 (GlobalMapper trial versión y Nasa World Wind).

Para el conjunto de las 10 visuales trazadas, la combinación de las densidades D1 a D4, anchuras de PV $a = 0,1 \text{ m}$; $0,2 \text{ m}$; $0,3 \text{ m}$; $0,4 \text{ m}$ y $0,5 \text{ m}$ y alturas de UPR $b = 0,03 \text{ m}$; $0,05 \text{ m}$; $0,07 \text{ m}$ y $0,10 \text{ m}$, arroja un total de 800 observaciones para este caso.

En la Figura 131 pueden observarse las representaciones tridimensionales de las 10 visuales para una combinación de densidad de la nube de puntos, anchura del PV y altura de la UPR.



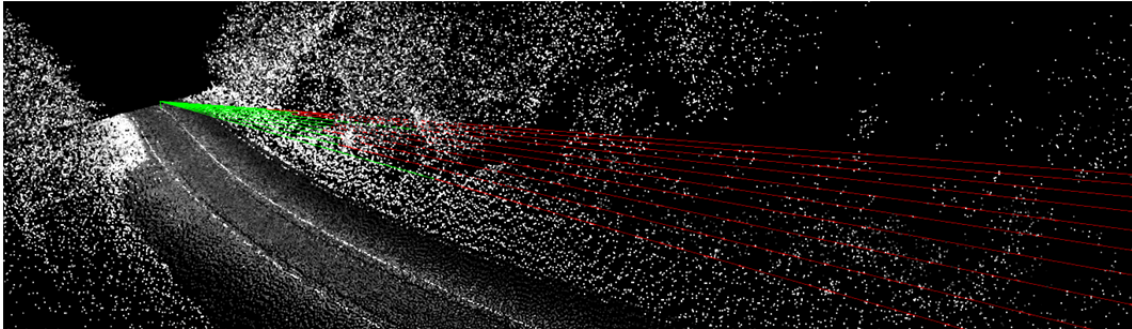


Figura 131: Perspectivas obtenidas de la visualización tridimensional de las visuales y de la nube de puntos LiDAR para el caso 2. Carretera CP-29-25 (Nasa World Wind)

La tasa de éxito resultante en este caso es superior al 99% en la totalidad de combinaciones de densidad, anchura de PV y altura de UPR (Figuras 132, 133 y 134).

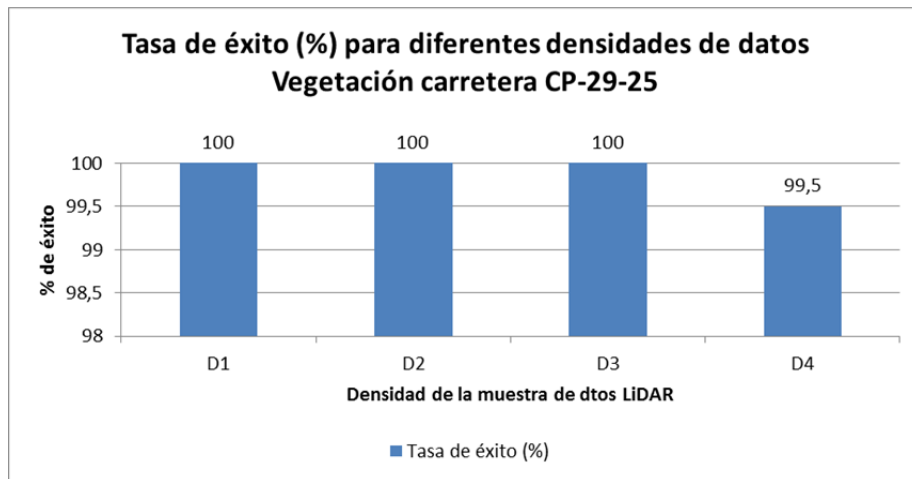


Figura 132: Vegetación interior en una curva. Tasas de éxito para diferentes anchuras de PV. Carretera CP-29-25

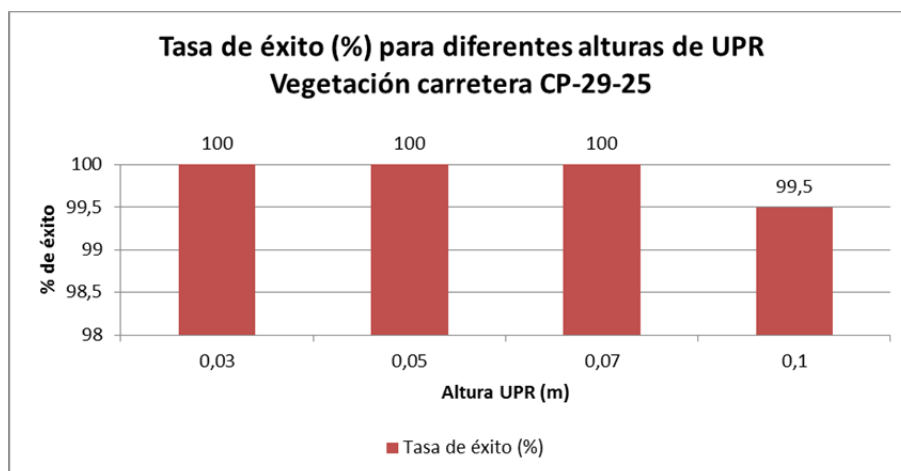


Figura 133: Vegetación interior en una curva. Tasas de éxito para diferente altura de UPR. Carretera CP-29-25

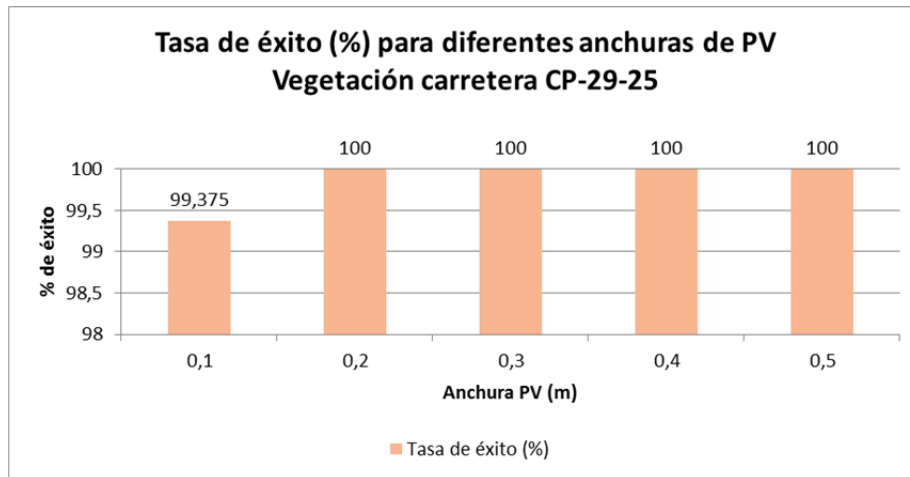


Figura 134: Vegetación en el interior de una curva. Tasas de éxito para anchura de PV.
Carretera CP-29-25

4.6.1.3 Caso 3: Limitación de visión por presencia de un acuerdo vertical convexo

La presencia de un acuerdo vertical limitando la distancia de visibilidad disponible constituye otro de los casos más habituales de deficiente visión en carreteras. Esta situación se produce en algunos tramos de las dos carreteras con muestra de datos.

En este caso, al igual que en el caso de obstáculos situados en el interior de una curva, la concepción tradicional de la visión basada en una única línea recta visual trazada desde un observador hasta un punto objetivo, considera la tangencia de dicha recta con la plataforma como la situación límite en que dicha línea puede ser dibujada entre ambos puntos sin interrupción, determinando de esta forma la existencia o no de visión (Figura 135).

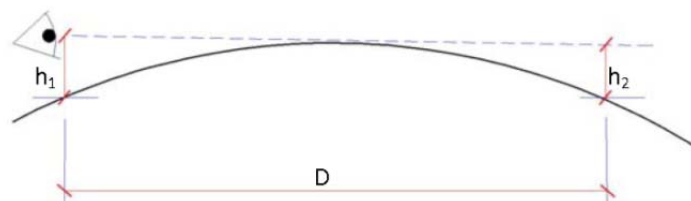


Figura 135: Concepción tradicional de visión en un acuerdo vertical convexo basada en la tangencia de la línea visual con la rasante

Sin embargo, la incorporación del concepto del prisma visual (PV) y de la unidad prismática rectangular (UPR), en sustitución de la tradicional línea visual, introduce de nuevo ciertas variaciones relacionadas con la altura de la UPR (Figura 136).

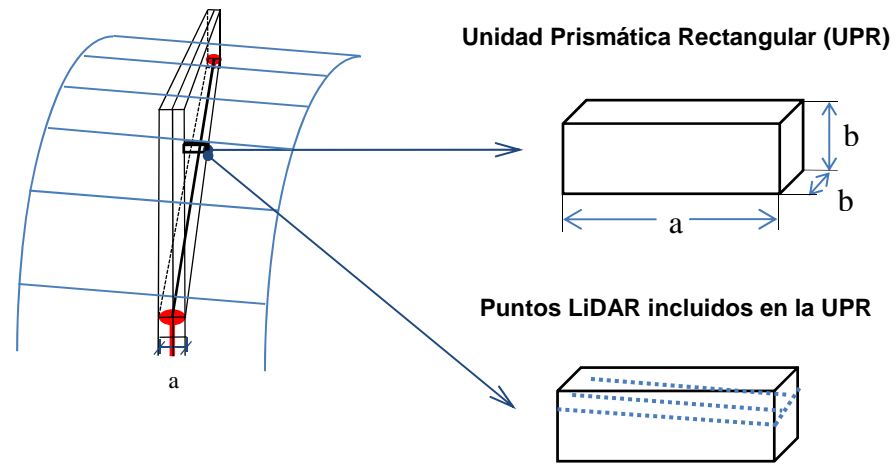


Figura 136: Representación esquemática de la Intersección de la unidad prismática rectangular con la superficie de rasante en un acuerdo vertical convexo

De acuerdo con la metodología de PV, en un acuerdo vertical convexo las dimensiones de la UPR, la pendiente transversal de la plataforma, la pendiente longitudinal y la densidad y disposición de los puntos resultantes del escaneado LiDAR, determinan el número de puntos localizados dentro de cada UPR.

En la Figura 137 se representa una sección del plano vertical que contiene a la línea visual.

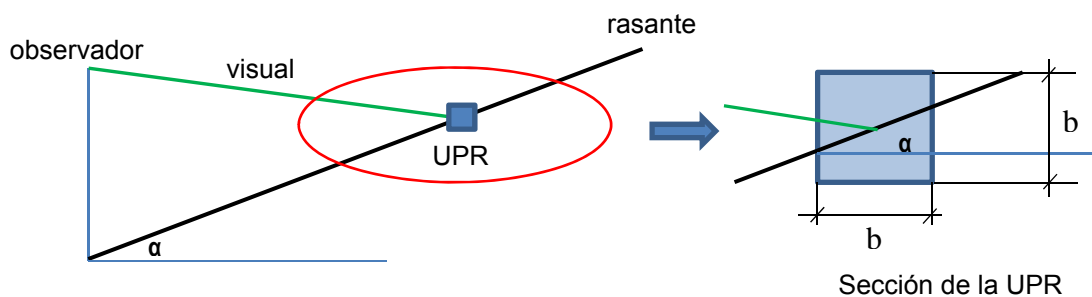


Figura 137: Acuerdo convexo: Representación esquemática de la incidencia de la línea visual sobre la rasante y sección vertical de la UPR en el punto de intersección

Debido a la propia dimensión b de la UPR y al valor relativamente reducido de las pendientes longitudinales en carretera, el efecto de la inclinación de la rasante es muy

limitado. Suponiendo una rasante recta, para dichas pendientes puede asumirse como suficientemente aproximado de acuerdo con lo expresado en la Ecuación 44.

$$\alpha \sim \text{tga} \sim i \tag{44}$$

Donde:

α = ángulo que forma la rasante con el plano horizontal (rad)

i = inclinación de la rasante (en tanto por uno)

En ese caso, para que los puntos LiDAR queden dentro de la UPR, la separación longitudinal máxima S entre ellos siguiendo la alineación de la visual verifica la expresión de la Ecuación 45.

$$S = \frac{b}{\cos \alpha} \sim \frac{b}{\cos i} \sim b \tag{45}$$

Donde:

S = longitud del tramo de rasante intersectado por una sección vertical de la UPR

b = dimensión cuadrangular de la sección vertical de la UPR

i = pendiente longitudinal (en tanto por uno)

En caso contrario, la existencia o no de puntos LiDAR dependerá además, del efecto combinado de las dimensiones a y b de la UPR, así como de la disposición de los puntos LiDAR que resulte del sistema de distribución de haces láser empleado en el escaneo (Figuras 138 y 139).

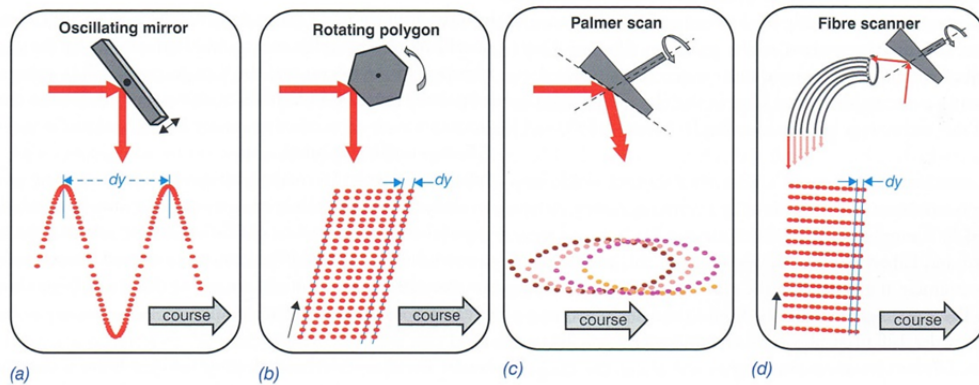


Figura 138: Mecanismos de escaneo y muestras de puntos LiDAR resultantes

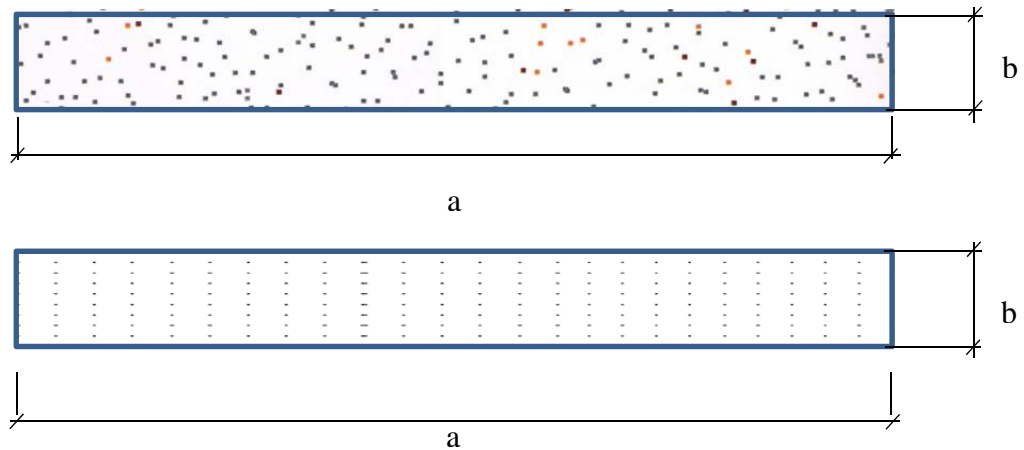


Figura 139: Ejemplo de proyección sobre el plano horizontal de puntos LiDAR contenidos en la UPR para distintos tipos de escaneado

Para evitar que la visual penetre entre los puntos de la calzada, arrojando un falso dato de visibilidad positiva, la densidad de puntos obtenidos en la superficie de la calzada deberá ser suficiente como para que al menos uno de ellos quede incluido en la UPR.

La Tabla 17 resume las superficies de una sección horizontal de la UPR para las dimensiones de a y b consideradas mientras que en la Tabla 18 se expresa el número de puntos LiDAR por m^2 mínimo necesario para que la sección correspondiente albergue al menos un punto en su interior.

Tabla 17: Superficies resultantes de la proyección de las UPR consideradas sobre un plano horizontal

Superficie (m^2)					
	a (m)				
b (m)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,03	0,003	0,006	0,009	0,012	0,015
0,05	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025
0,07	0,007	0,014	0,021	0,028	0,035
0,1	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050

Tabla 18: Densidad de puntos mínima teórica por debajo de las cuáles se puede producir la penetración de la visual en la rasante

Densidad de puntos mínima (pts/ m^2)					
	a (m)				
b (m)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,03	333	167	111	83	67
0,05	200	100	67	50	40
0,07	143	71	48	36	29
0,1	100	50	33	25	20

Teniendo en cuenta que las densidades de las muestras disponibles en esta investigación resultan variables a lo largo del trazado con valores medios en calzada de 113 pts/m² en la carretera CV-35 y de 2.520 pts/m² en la carretera de Lugo CP-29-25 (muestra original D1), en la Tabla 19 se resumen las combinaciones de *a* y *b* que teóricamente pueden provocar penetraciones no deseadas de la visión a través de la calzada.

Tabla 19: Dimensiones de la UPR aptas para el cálculo de visión en acuerdos convexos

Aptitud teórica de las dimensiones de la UPR para el cálculo de visión. Carretera CV-35. Tres láser escáner SICK (40 kHz)					
	<i>a</i> (m)				
<i>b</i> (m)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,03					
0,05					
0,07					
0,1					

Aptitud teórica de las dimensiones de la UPR para el cálculo de visión. Carretera CP-29-25. Dos láser escáner OPTTECH LYNX (1MHz)																				
	<i>a</i> (m)																			
	0,10				0,20				0,30				0,40				0,50			
<i>b</i> (m)	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4
0,03																				
0,05																				
0,07																				
0,1																				

- Dimensiones aptas (Densidad media de puntos LiDAR en calzada suficiente)
- Dimensiones no aptas (Densidad media de puntos LiDAR en calzada insuficiente)

Las combinaciones de anchura de PV de entre 0,1 y 0,2 m, y altura de la UPR de 0,03 m, pueden provocar falsas visibilidades cuando el escaneado se produce a 40kHz a velocidades de circulación entre 30 y 70 km/h. Esta misma circunstancia se produce también para la muestra de densidad D4 con dimensiones de UPR de 0,1x0,03x0,03 m cuando los datos originales, escaneados a 1MHz, se han reducido en 8 veces.

Existe toda una casuística asociada a la visibilidad disponible en presencia de acuerdos verticales. En carreteras de nuevo trazado, el acuerdo vertical convexo es dimensionado en las guías de diseño atendiendo a las condiciones de visibilidad diurnas, mientras que el acuerdo cóncavo debe sus parámetros a la consideración de suficiente visibilidad de parada en condiciones de circulación nocturnas.

En un tramo de planta recta con presencia de un acuerdo vertical convexo, en condiciones de circulación diurna la altura de la UPR provoca una disminución de la distancia de visibilidad disponible.

En este caso, según el tradicional concepto de línea visual, la visibilidad disponible viene determinada por las Ecuaciones 46 y 47 (Figura 140).

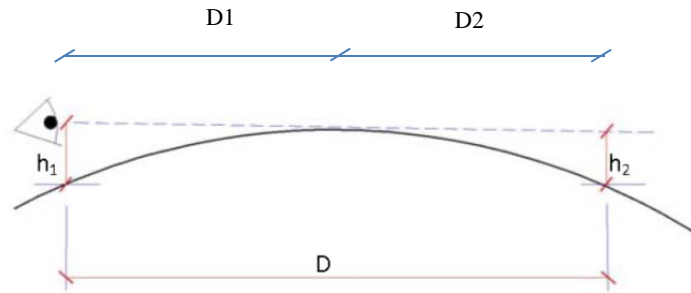


Figura 140: Parámetros para la obtención de la distancia disponible dentro de un acuerdo convexo para alturas de observador y obstáculo h_1 y h_2 respectivamente

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot Kv} \rightarrow h_1 = \frac{D_1^2}{2 \cdot Kv} \rightarrow D_1^2 = 2 \cdot Kv \cdot h_1 \quad (46)$$

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot Kv} \rightarrow h_2 = \frac{D_2^2}{2 \cdot Kv} \rightarrow D_2^2 = 2 \cdot Kv \cdot h_2 \quad (47)$$

Donde:

Kv: parámetro de la parábola del acuerdo (m)

h_1 : altura del punto de vista sobre la calzada (m)

h_2 : altura del objeto sobre la calzada (m)

D: visibilidad disponible (m)

dado que $D = D_1 + D_2$,

se verifica la expresión de la Ecuación 48.

$$D = \sqrt{2 \cdot Kv} \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \rightarrow D^2 = 2 \cdot Kv \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2 \rightarrow Kv = \frac{D^2}{2 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2} \quad (48)$$

Al introducir el concepto de unidad prismática rectangular (UPR) de una cierta altura b , la visibilidad disponible se modifica reduciéndose por efecto de esa altura (Figura 141).

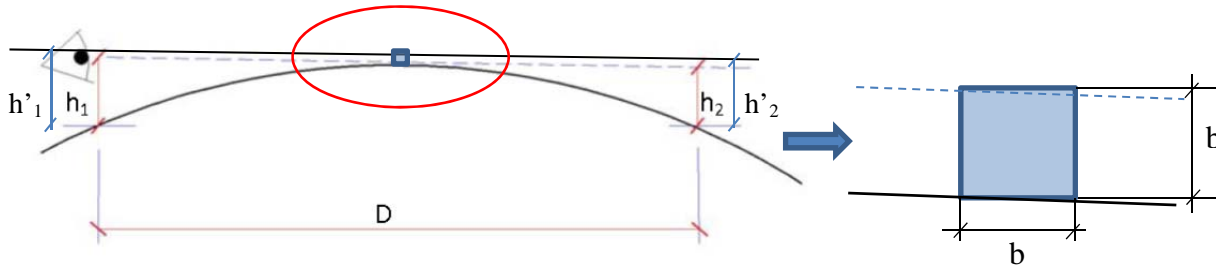


Figura 141: Efecto de la UPR en la consideración de la existencia de visión en un acuerdo convexo

Habida cuenta de las pendientes longitudinales en carreteras, asumiendo las mismas simplificaciones adoptadas en el diseño geométrico, de forma suficientemente aproximada puede considerarse que el efecto de la altura de la UPR equivale a la consideración de una nueva línea visual trazada entre las alturas h'_1 y h'_2 de acuerdo con las expresiones de las Ecuaciones 49 y 50:

$$h'_1 = h_1 - b \quad (49)$$

$$h'_2 = h_2 - b \quad (50)$$

Donde:

h_1 : altura del punto de vista sobre la calzada (m)

h_2 : altura del objeto sobre la calzada (m)

b : altura de la UPR (m)

h'_1 : altura del punto de vista sobre la calzada corregida por efecto de la altura de la UPR (m)

h'_2 : altura del objeto sobre la calzada corregida por efecto de la altura de la UPR (m)

De este modo la nueva distancia de visibilidad disponible verifica la Ecuación 51.

$$D' = \sqrt{2 \cdot Kv} \cdot (\sqrt{h'_1} + \sqrt{h'_2}) \quad (51)$$

Donde

D' : visibilidad disponible reducida por efecto de la altura de la UPR (m)

Para las alturas de UPR consideradas en esta investigación (coherentes con las actuales precisiones absolutas de los sistemas LiDAR mobile), el efecto en la distancia de visibilidad disponible para las alturas de observador y obstáculo consideradas en las guías de diseño M. Fomento, 2000 y AASHTO, 2011 se resumen en la Tabla 20 para distintos parámetros Kv del acuerdo vertical.

Tabla 20: Distancia de visibilidad disponible para diferentes alturas de UPR para alturas de observador y obstáculo establecidas por el M. Fomento, 2000 (a) y la AASHTO, 2011 (b)

Distancia de visibilidad disponible (m) para diferentes Kv de acuerdo convexo según alturas de observador y obstáculo h1 y h2. M.Fomento, 2000					
Kv (m)	h1 = 1,10 h2 = 0,20	h1 = 1,10-b h2 = 0,20-b			
		b=0,03	b=0,05	b=0,07	b=0,10
303	36,8	35,6	34,8	33,9	32,4
1085	69,7	67,4	65,8	64,1	61,3
3050	116,8	113,0	110,3	107,4	102,8
7125	178,6	172,7	168,6	164,2	157,1
15276	261,5	252,9	246,8	240,4	230,1
30780	371,2	358,9	350,3	341,3	326,6

a)

Distancia de visibilidad disponible (m) para diferentes Kv de acuerdo convexo según alturas de observador y obstáculo AASHTO, 2011					
Kv (m)	h1 = 1,08 h2 = 0,60	h1 = 1,08-b h2 = 0,60-b			
		b=0,03	b=0,05	b=0,07	b=0,10
303	44,7	43,8	43,2	42,7	41,8
1085	84,5	82,9	81,8	80,7	79,1
3050	141,7	139,0	137,2	135,4	132,5
7125	216,5	212,4	209,7	206,9	202,6
15276	317,0	311,1	307,0	302,9	296,6
30780	450,0	441,6	435,8	430,0	421,1

b)

De acuerdo con los resultados anteriores, los porcentajes de reducción de la distancia de visibilidad disponible para cada una de las alturas de UPR, con respecto a la obtenida por consideración de una línea visual en un acuerdo convexo con planta recta, se resumen en la Tabla 21.

Tabla 21: Porcentaje de reducción de la visibilidad disponible para diferentes alturas de UPR y alturas de observador y obstáculo según criterios M. Fomento, 2000 y AASHTO, 2011

Reducción en la distancia de visibilidad disponible (%) para diferentes alturas de la UPR (b)				
	Altura de la UPR (m)			
	b=0,03	b=0,05	b=0,07	b=0,10
M.Fomento,2000	3,3	5,6	8,1	12,0
AASHTO, 2011	1,9	3,2	4,5	6,4

El caso analizado se encuentra en la muestra de menor frecuencia de escaneo presente en la carretera CV-35, en un tramo con una ligera curvatura en planta de modo que las visuales no queden superpuestas y se facilite el análisis y la visualización posterior. Las visuales sometidas a estudio se han trazado entre dos puntos observador y objetivo situados sobre la calzada. Las posiciones y alturas de dichos puntos se mantienen también constantes en todos los casos de modo que no se constituyan en variables del análisis. Ambos se sitúan sobre la línea de referencia (línea blanca de separación de sentidos de circulación), a alturas de 1,08 m y 0,60 m, respectivamente, de acuerdo con los criterios AASHTO 2011.

El acuerdo vertical convexo se encuentra en el punto kilométrico de referencia 3+300 y dispone de un parámetro $K_v = 3.257$ m con pendientes de entrada y salida del 3% y del -2,53%, respectivamente (Figura 142).

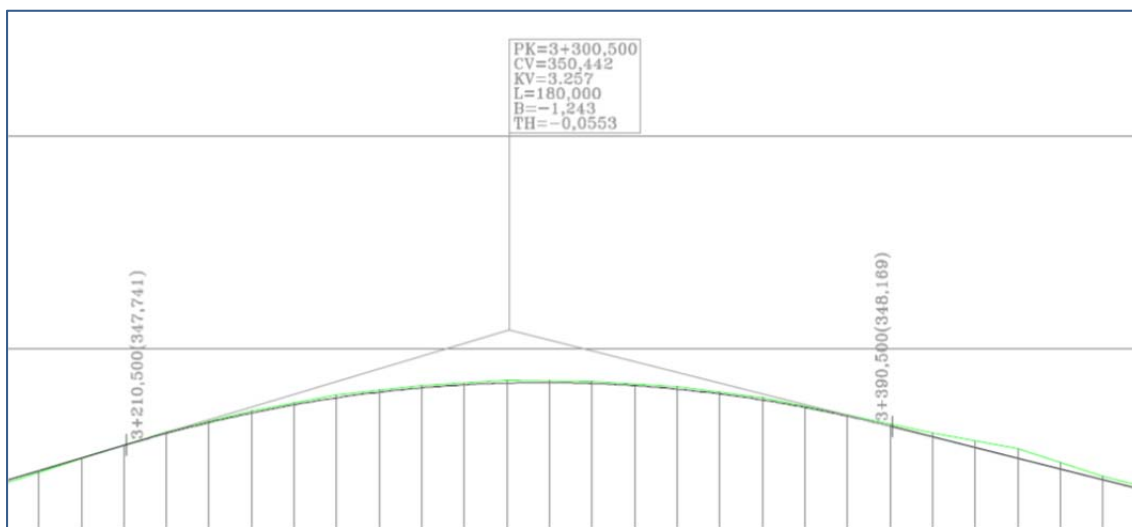


Figura 142: Caso analizado: acuerdo vertical convexo en la carretera CV-35.

Desde la rasante recta de aproximación, la limitación a la visión resulta en este caso evidente, por lo que las visuales trazadas contra la plataforma de la carretera deben arrojar un resultado negativo de visión, lo que es considerado “éxito” para ese resultado. Por el contrario, una falsa penetración de la visual a través de la plataforma se registra como un “fracaso” para ese resultado. El análisis concluirá con las tasas de éxito o fracaso obtenidas para diferentes valores de anchura de PV y de altura de UPR.

En este análisis se ha establecido un punto de observación situado sobre el eje en la rasante recta de aproximación al acuerdo vertical. Desde él, se han radiado 8 visuales hasta otros tantos puntos objetivo también situados sobre el eje a una distancia tal que se produzca intersección con la plataforma en puntos diversos y con ángulos de incidencia en la plataforma variables (Figura 143).

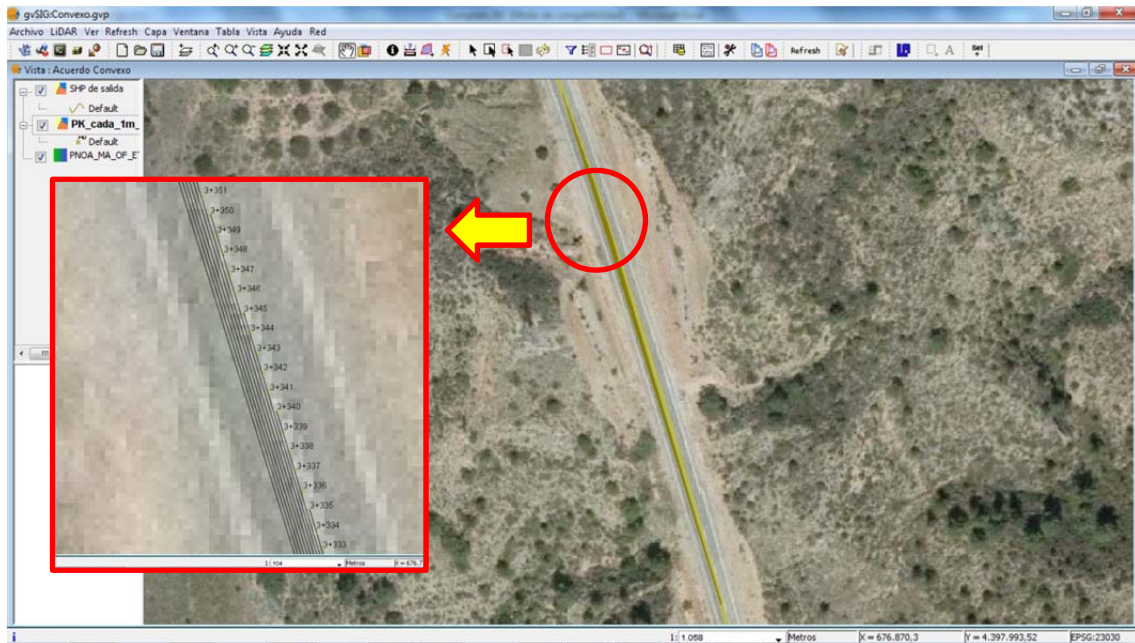


Figura 143: Punto de observación y visuales radiadas desde él con intersección en el acuerdo convexo (carretera CV-35, GvSIG)

Para facilitar la interpretación y validación de resultados éstos son también visualizados en tres dimensiones mediante la aplicación Nasa World Wind (Figura 144).

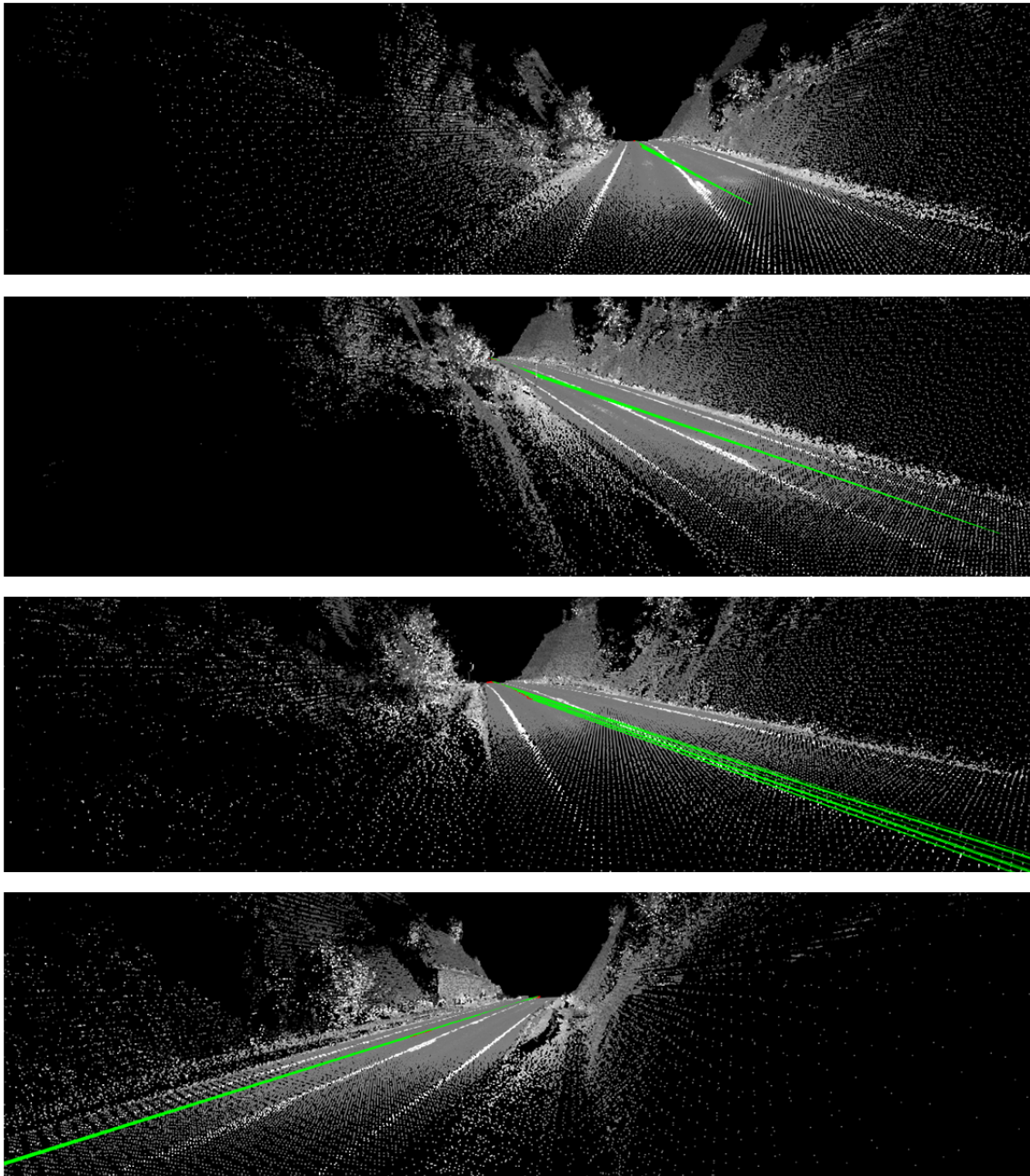


Figura 144: Acuerdo vertical convexo. Diferentes perspectivas obtenidas de la visualización tridimensional de las visuales y de la nube de puntos LiDAR. Carretera CV-35.

La frecuencia del equipo empleado en este caso se considera cota inferior de los actuales sistemas Lidar Mobile presentes en el mercado, por lo que la muestra de datos ha sido empleada directamente sin ningún tipo de modificación sobre la densidad resultante.

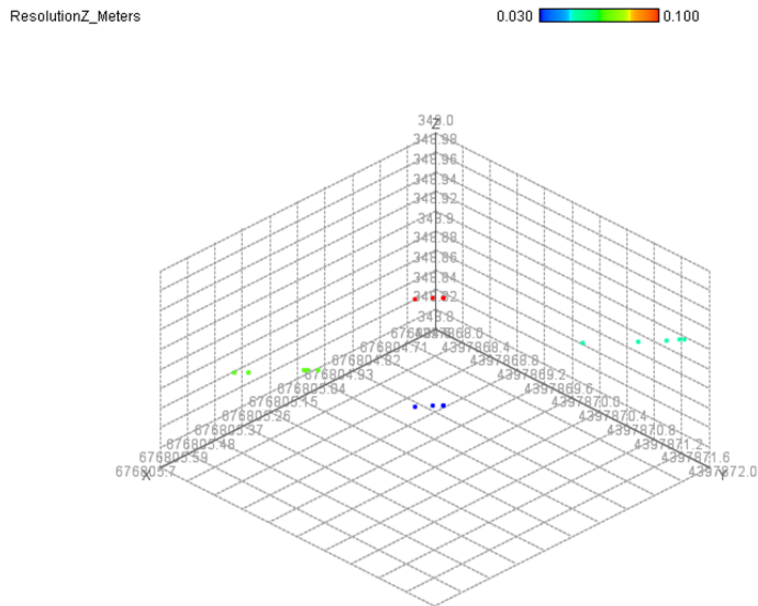
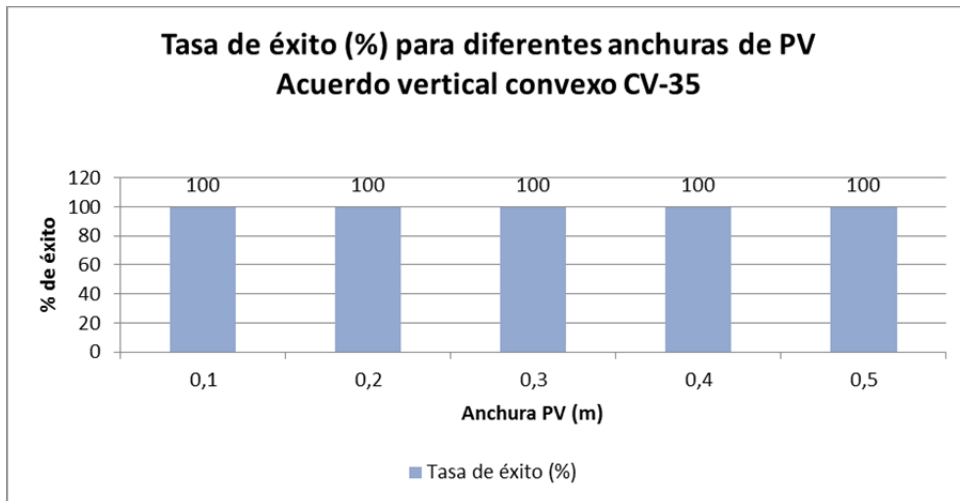


Figura 146: Acuerdo convexo: Posición del obstáculo localizada para diferentes valores de anchura de PV y altura de UPR. Color por altura de la UPR. (Carretera CV-35. PK 3+200, Visual 3)

No se ha producido penetración de visual en ninguna combinación de las variables densidad, anchura de PV y altura de UPR consideradas, habiéndose obtenido por tanto una tasa de éxito del 100%. (Figura 147).

a)



b)

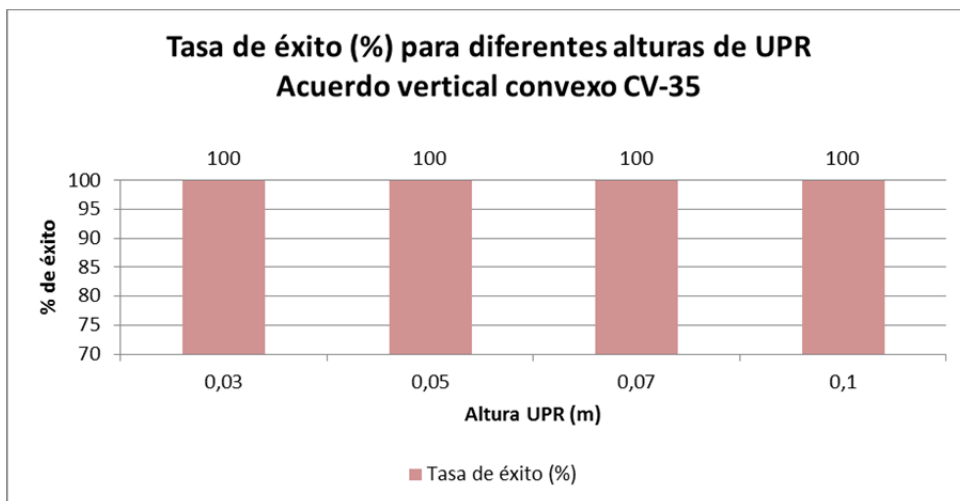


Figura 147: Acuerdo vertical convexo. Tasas de éxito para diferentes anchuras de PV (a) y alturas de UPR (b). Carretera CV-35

Los resultados obtenidos confirman la elevada probabilidad de inclusión de algún punto LiDAR en las UPR en que se divide el PV cuando la visual incide sobre la superficie de la plataforma con un pequeño ángulo.

No obstante, en el caso de acuerdos convexos, la identificación de la posición del obstáculo a la visión se ve asimismo condicionada por las reducidas pendientes longitudinales que pueden darse en la cresta de los acuerdos convexos, en combinación con líneas visuales que forman también un reducido ángulo con el plano horizontal.

La consideración de diferentes alturas de la UPR puede provocar diferencias de varios metros entre la posición de la celda identificada como obstáculo, de ahí la mayor dispersión en los puntos obstáculo observada en este caso en relación a los casos de vegetación y talud de desmonte. En el caso estudiado, los centros de las UPR identificados

como primer obstáculo pueden encontrarse distanciados entre sí hasta 14,70 m. En la Figura 148 se representa el caso de la visual que provoca mayores diferencias en la identificación del obstáculo de entre las analizadas.

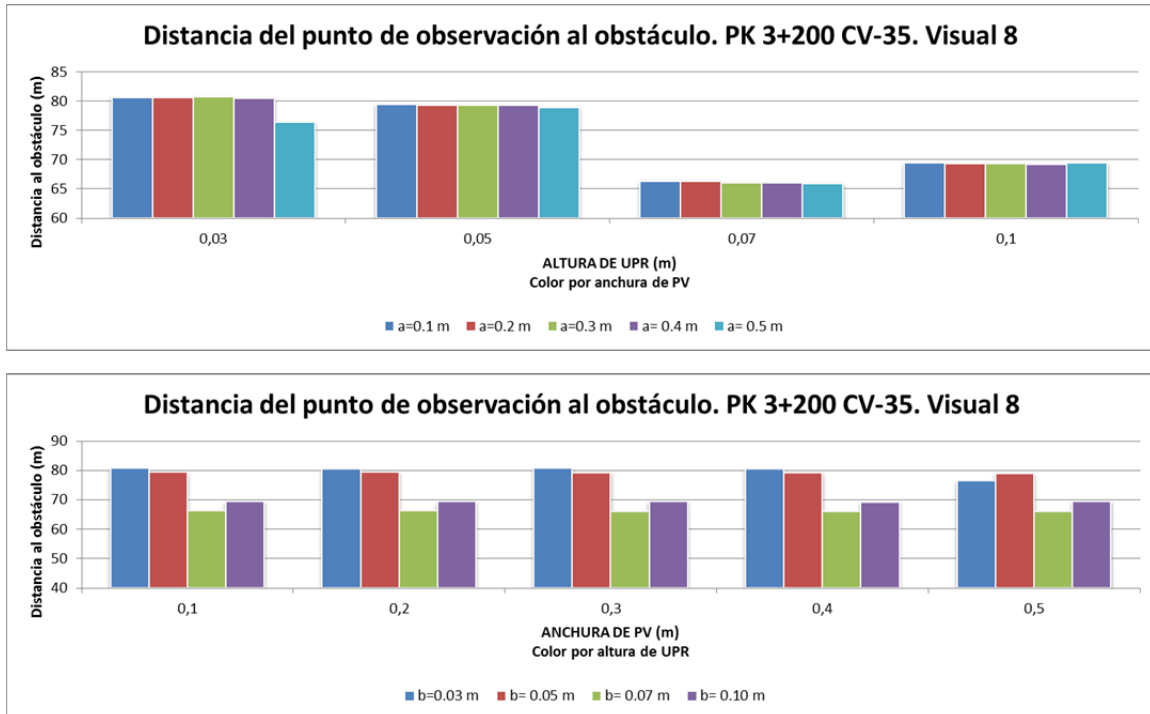


Figura 148: Acuerdo convexo. Distancias al obstáculo identificado para diferentes alturas de UPR (figura superior) y anchuras de PV (figura inferior). (Carretera CV-35 P.K. 3+200. Visual 8)

Cabe asimismo destacar que en el caso analizado, de entre los puntos obstáculo identificados los que resultan más próximos al observador no siempre se han correspondido con las mayores alturas de UPR. Para reflexionar sobre esta circunstancia, en la Figura 149 se ejemplifica un caso teórico en el que tanto la línea de rasante (color cyan) como la línea visual (color magenta), discurren con pendientes muy reducidas. En este ejemplo puede observarse cómo dimensiones mayores de altura de la UPR pueden provocar posicionamientos del obstáculo longitudinalmente más alejados.

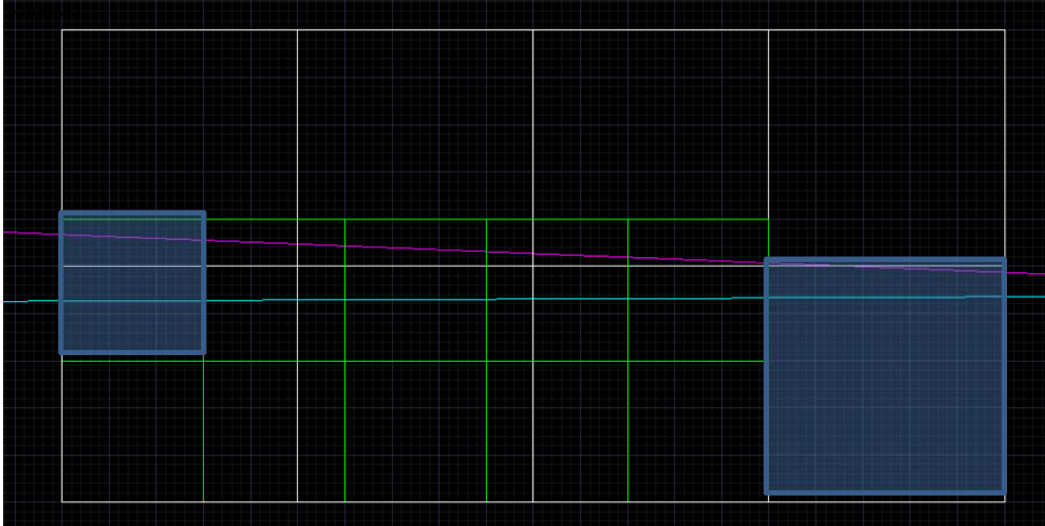


Figura 149: Ejemplo de diferente posicionamiento longitudinal del obstáculo para diferentes alturas de UPR

4.6.1.4 Dimensiones del PV y de la UPR

Como conclusión, de acuerdo con los análisis anteriores, para los casos y los equipos de toma de datos considerados se demuestra que:

Caso 1. Caso de talud de desmonte:

- De acuerdo con los valores de densidad media obtenidas a nivel de calzada, en taludes de excavación, muros o superficies regulares:
 - Las combinaciones de altura de la UPR de 0,03 m y anchuras del PV de 0,1 y 0,2 m, puede resultar en valores insuficientes de densidad en la muestra de datos original tomada con equipo IPS-2 (40.000 ptos/s) cuando la incidencia de la visual es ortogonal a la superficie.
 - El equipo Opetch Lynx por su parte, proporciona suficiente densidad de puntos en todos los casos para su muestra original a nivel de calzada en las densidades D1, D2, D3 y D4. La muestra D4 (muestra original reducida en la relación 1/8), sin embargo, puede no resultar de suficiente densidad para las dimensiones de prisma $a = 0,1$ m y $b = 0,03$ m cuando la incidencia de la visual sea ortogonal a la superficie.
- El caso correspondiente al equipo Optech ha arrojado un 100% de éxito en la identificación del obstáculo para todos los casos analizados excepto para la combinación de la muestra D3, con un PV de 0,1 m de anchura y una altura de 0,05 m de la UPR.
- En el caso correspondiente al equipo IPS-2 (40.000 ptos/s), las dimensiones mínimas de altura de UPR que generan un 100% de tasa de éxito en todos los casos se corresponden con 0,1 m. Sin embargo esta dimensión no es coherente

con la precisión del equipo aportada por el fabricante (0,04 m de error absoluto a 5 m de distancia del sistema), lo que implica perder precisión al generar escalones de altura superiores a la precisión del equipo. Con alturas de UPR de 0,05 m la anchura mínima de PV con tasa de éxito del 100% es de 0,3 m, sin embargo, se han registrado fracasos para esta misma altura de UPR y anchura de PV de 0,4 m, volviéndose al 100% de éxito para anchuras de PV de 0,5 m con esta misma altura de UPR.

Caso 2. Caso de vegetación en el interior de una curva:

- Este caso, analizado con muestras de diferente densidad a partir de la original obtenida del equipo Optech presenta tasas de éxito del 100% en todas las combinaciones de densidad, anchura de PV y altura de UPR consideradas, excepto para la muestra de densidad D4 y altura y anchura de UPR y de PV de 0,1 m.

Caso 3. Caso de acuerdo vertical convexo:

- De acuerdo con los valores de densidad media obtenidos a nivel de calzada aún en el caso del equipo de menor frecuencia y menores densidades de muestra IPS-2 (40.000 ptos/s), el análisis teórico llevado a cabo demuestra que anchuras de PV de 0,1 y 0,2 m para alturas de UPR de 0,03 m, pueden provocar falsas penetraciones de la visual en la superficie del pavimento.
- Para las diferentes densidades obtenidas a partir de la muestra Optech, la muestra D4 en combinación con anchura de PV de 0,1 m y altura de UPR de 0,03 m puede provocar falsas penetraciones de la visual en la superficie del pavimento.
- Para el caso real analizado situado en la carretera CV-35, con muestra obtenida por el equipo IPS-2, se ha obtenido una tasa de éxito del 100% en todas las combinaciones de anchura de PV y de altura de UPR. Los resultados obtenidos confirman la elevada probabilidad de inclusión de algún punto LiDAR en las UPR en que se divide el PV cuando la visual incide sobre la superficie de la plataforma con un pequeño ángulo.
- No obstante, en el caso de acuerdos convexos, la identificación de la posición del obstáculo a la visión se ve asimismo condicionada por las reducidas pendientes longitudinales que pueden darse en la cresta de los acuerdos convexos, en combinación con líneas visuales que forman también un reducido ángulo con el plano horizontal. La consideración de diferentes alturas de la UPR puede provocar diferencias de varios metros entre la posición de la celda identificada como obstáculo, de ahí la mayor dispersión en los puntos obstáculo observada en este caso en relación a los casos de vegetación y talud de desmonte. En el caso estudiado, los centros de las UPR identificados como primer obstáculo pueden encontrarse distanciados entre sí hasta 14,70 m. En la Figura 146 se representa el caso de la visual que provoca mayores diferencias en la identificación del obstáculo de entre las analizadas.

Dado que en un análisis global de visibilidad disponible, la casuística de obstrucción a la visión puede ser variada e incluir, al menos, alguno o todos los casos anteriores, las dimensiones de la UPR que han supuesto una tasa de éxito del 100% para todas las combinaciones de muestra han sido de 0,50x0,05x0,05m (anchura de PV de 0,50 m). Dimensiones inferiores pueden disminuir las posibilidades de éxito en la identificación del obstáculo.

Estas dimensiones son, por tanto, las empleadas en los análisis posteriores para la obtención de la visibilidad disponible por la metodología de prismas visuales.

4.6.1.5 Tiempos de proceso

Para todos los casos analizados se han obtenido los tiempos de proceso invertidos en el cálculo a partir de los algoritmos desarrollados.

Para la misma visual analizada, cuando se mantienen constantes las dimensiones del PV y de la UPR, los tiempos invertidos en el cálculo han resultado proporcionales a la densidad de puntos de las muestras consideradas.

Por su parte, la diferencia de tiempos entre unos casos y otros (talud de desmonte, vegetación o acuerdo convexo), depende del número de puntos LiDAR encontrados en cada prisma visual. Esta circunstancia impide realizar por tanto comparaciones al intervenir la forma y dimensiones de los objetos escaneados que son intersectados por el prisma visual.

En las Tablas 22 y 23 se muestran los tiempos obtenidos con un ordenador PC Core i7 a 2,2GHz con 8GB de memoria RAM en el cálculo de una visual para las diferentes muestras D1 a D4 definidas en los casos de talud de desmonte y vegetación en el interior de una curva con las dimensiones de PV de 0,50 m y de UPR de 0,50 x 0,05 x 0,05 m.

Tabla 22: Tiempo de proceso. Una visual y talud de desmonte en curva para diferentes densidades de muestra de datos LiDAR (PC i7 a 2,2GHz, 8GB RAM)

Talud desmonte en curva	Muestra de datos LiDAR			
	D1	D2	D3	D4
Tiempo de proceso	2' 20 s	1' 08 s	34 s	18 s

Tabla 23: Tiempo de proceso. Una visual y vegetación en el interior de una curva para diferentes densidades de muestra de datos LiDAR (PC Core i7 a 2,2GHz, 8GB RAM)

Vegetación en curva	Muestra de datos LiDAR			
	D1	D2	D3	D4
Tiempo de proceso	3' 15 s	1' 37 s	48 s	25 s

4.6.2 Estudio comparativo de las visibilidades obtenidas mediante prismas visuales (PV), modelo digital del terreno (MDT) y modelo digital de superficies (MDS).

En el tramo de la carretera CV-35 objeto de estudio, la Figura 150 representa conjuntamente los resultados de distancia de visibilidad de parada obtenidos para las tres metodologías sometidas a comparación: prismas visuales y software de diseño aplicado a un MDT y a un MDS.

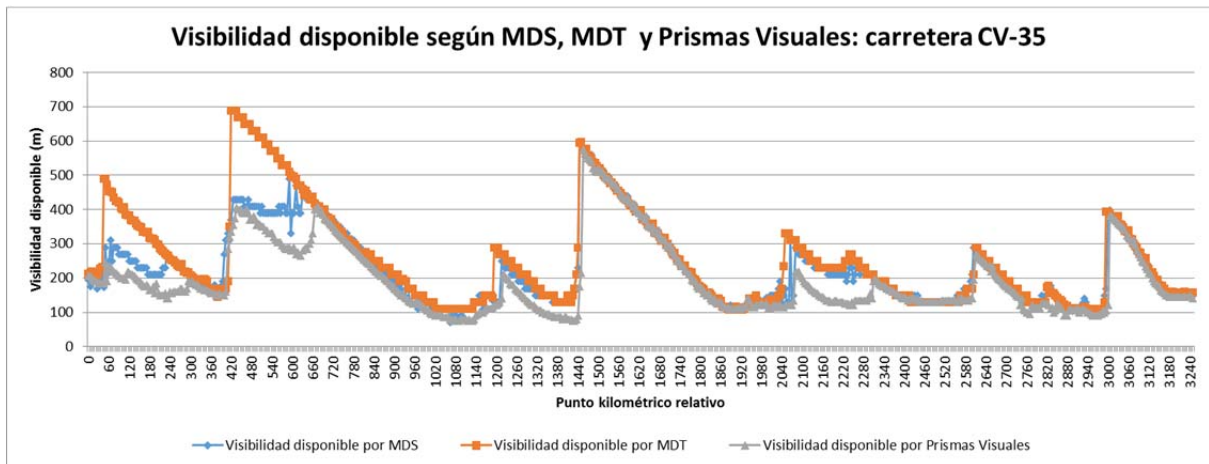


Figura 150: Visibilidades disponibles obtenidas mediante prismas visuales y software de diseño aplicado a MDT y a MDS (Carretera CV-35)

Los resultados difieren en mayor o menor medida en función del tramo considerado, siendo solo parcialmente coincidentes. Debido a la propia naturaleza variable de los obstáculos a la visión presentes en un tramo real de carretera, la visibilidad obtenida por cada metodología no se mantiene sistemáticamente superior ni inferior a las restantes, ni lo hace en una magnitud uniforme, aunque sí se observa que en una parte considerable del trazado, la visibilidad resultante a partir de la nueva metodología de prismas visuales, resulta inferior a la obtenida por aplicación de software de diseño aplicado tanto al MDT como al MDS.

Es objeto de este apartado analizar con detalle las diferencias observadas en relación con la tipología de obstáculo identificado, así como el efecto que sobre la suficiencia de visibilidad supondría la consideración de una u otra metodología. Para ello se han cuantificado y representado gráficamente tal y como se expone en los (Anexos 2 a 7).

4.6.2.1 Diferencia entre resultados de visibilidad según MDT, MDS y PV

En el Anexo 2 se incluyen los gráficos comparativos en los que se representa conjuntamente la visibilidad obtenida por cada metodología.

La visibilidad obtenida aplicando software de diseño geométrico de carreteras a un modelo digital del terreno (MDT), dispone de una representación gráfica que es habitual en los análisis de visibilidad contenidos en los proyectos y estudios de carreteras. En este caso, las variaciones de visibilidad presentan cambios uniformes, así como incrementos de visibilidad puntuales una vez superada la posición del obstáculo que impide la visión (Figura 151).

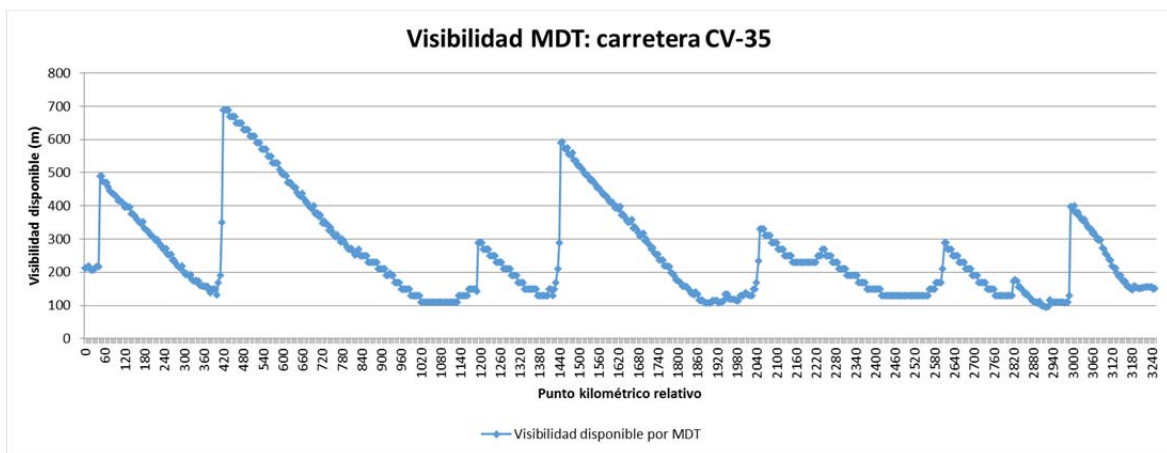


Figura 151: Visibilidades disponibles obtenidas mediante prismas visuales y software de diseño aplicado a MDT y a MDS (Carretera CV-35, pk. 0+000 a 0+500)

Sin embargo, las representaciones correspondientes a la aplicación de este mismo software a un modelo digital de superficies (MDS), o a la metodología de prismas visuales, disponen de variaciones no uniformes, con incrementos y decrementos de visibilidad en estaciones consecutivas netamente diferentes a las arrojadas por el MDT. Estas variaciones resultan coherentes con la consideración de otros obstáculos puntuales que no se encuentran presentes en un MDT y que no producen una variación tan uniforme de la visibilidad.

En la metodología de PV, de acuerdo con los resultados del estudio de densidades y dimensiones de PV y de UPR, las dimensiones seleccionadas para la UPR han sido de 0,50x0,05x0,05 m (anchura de PV de 0,50 m) que arrojan un 100% de tasa de éxito en los dos casos analizados.

En la Figura 152 pueden observarse conjuntamente y con mayor detalle los resultados obtenidos por las tres metodologías para los primeros 500 m.

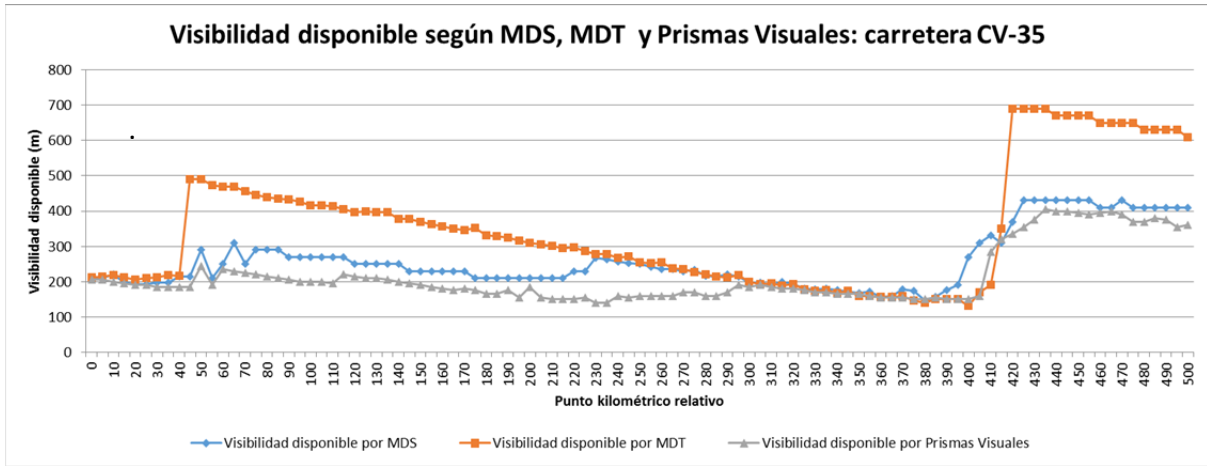


Figura 152: Visibilidades disponibles obtenidas mediante prismas visuales y software de diseño aplicado a MDT y a MDS (Carretera CV-35, pk. 0+000 a 0+500)

Donde la obstrucción a la visión se produce como consecuencia exclusivamente de la geometría de la carretera, es destacable el hecho de que los resultados sean netamente coincidentes.

El tramo comprendido entre los PK 1+500 a 2+000 correspondiente a un trazado en planta recto con presencia de un acuerdo vertical convexo en alzado representa este caso. Las tres metodologías arrojan resultados de visibilidad disponible próximos entre sí, aunque no exactamente iguales (Figura 153).

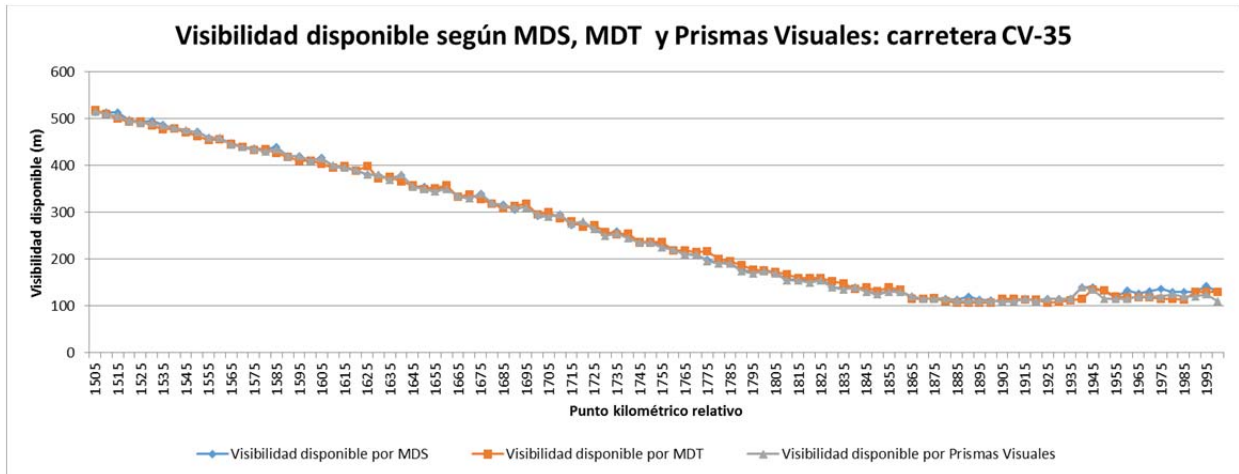


Figura 153: Visibilidades disponibles obtenidas mediante prismas visuales y software de diseño aplicado a MDT y a MDS (carretera CV-35, pk. 1+500 a 2+000)

En la totalidad del tramo analizado, los menores valores de visibilidad disponible se corresponden mayoritariamente con la metodología de prismas visuales, seguida de los que lo son por MDT y en menor medida por MDS (Figura 154).

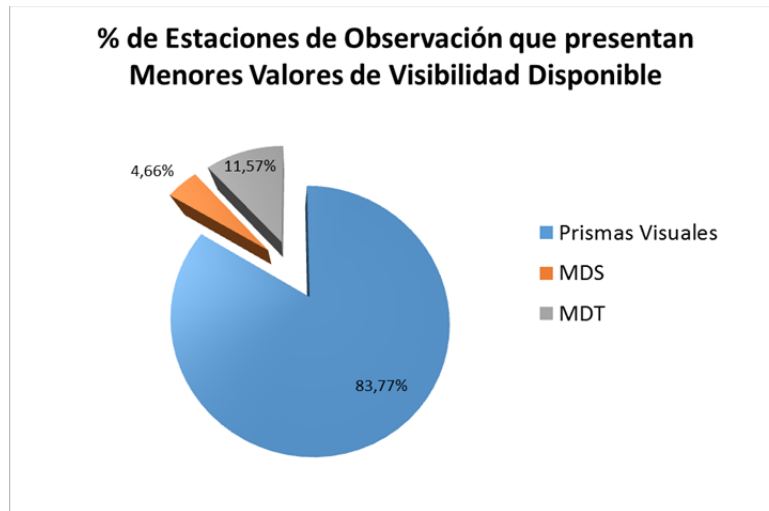


Figura 154: Carretera CV-35. Porcentaje de estaciones de observación correspondientes a cada metodología que presentan menores valores de visibilidad disponible

La metodología de prismas visuales (PV) se muestra, por tanto, más restrictiva que aquellas basadas en la aplicación de software de diseño a MDT o MDS en un porcentaje elevado del trazado (Anexos 2 a 6).

Cuando la metodología de PV arroja el menor valor de visibilidad disponible, resulta asimismo de interés cuantificar la diferencia de visión que provoca con respecto a las otras metodologías analizadas. Si de estas últimas, se selecciona aquella que obtiene un menor valor de visibilidad, en un 24,5% de los casos, la diferencia es superior a los 50 m, superando los 100 m en un 5,4% de los casos (Figura 155).

Esto supone diferencias notables en un número de estaciones no despreciable, por lo que existe un gran número de ubicaciones que arrojan déficits de visibilidad ampliamente superiores a los establecidos por las metodologías habituales basadas en MDT e incluso en MDS.

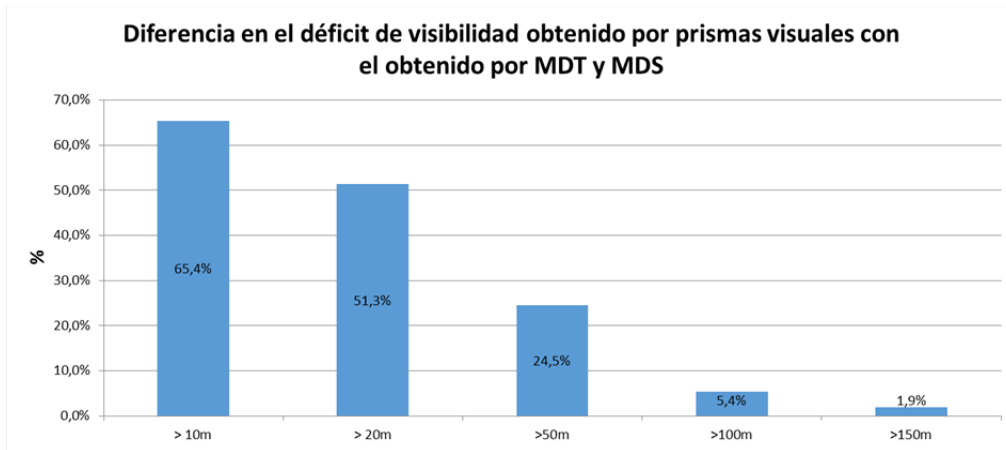


Figura 155: Proporción de puntos de observación en los que la metodología de prismas visuales supone un déficit de visibilidad superior al mínimo valor de visibilidad obtenido por las metodologías basadas en MDT y MDS (carretera CV-35)

Para cuantificar la importancia de las diferencias de visibilidad registradas en cada punto del trazado, estas deben necesariamente referirse a la velocidad correspondiente a dicho punto.

El conocimiento de las velocidades practicadas por los vehículos permite enmarcar los resultados anteriores estableciendo los déficits de visibilidad respecto a la requerida según la guía de diseño de referencia AASHTO (2011).

Con este fin, teniendo en cuenta las limitaciones de incluir un solo caso de análisis, en esta investigación se han adoptado como velocidades de referencia las correspondientes a la estimación de la velocidad de operación (V85) a partir de las características geométricas conocidas de la carretera. La metodología empleada para dicha estimación ha sido la desarrollada por Pérez et al. (2012) (Figura 156).

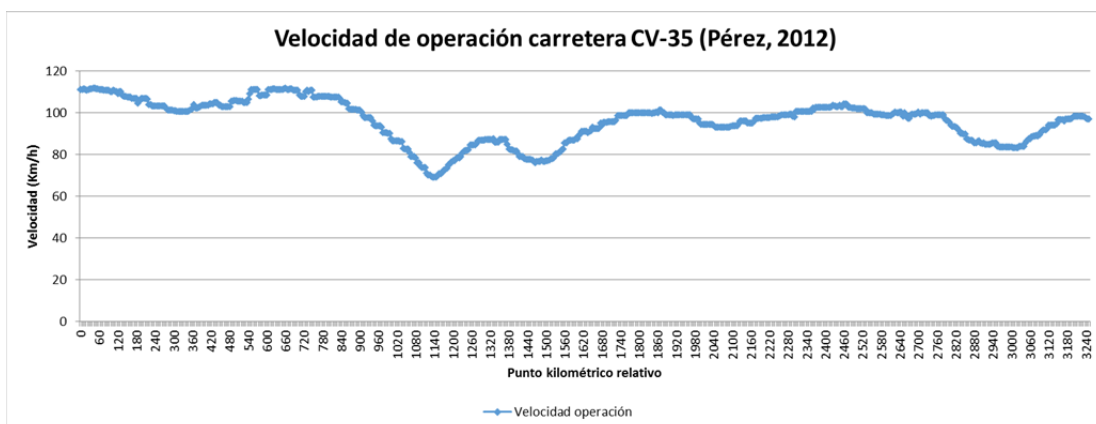


Figura 156: Velocidad de operación V85 estimada en el tramo de carretera CV-35 analizado según la metodología de Pérez, 2012

De acuerdo con la formulación de la AASHTO 2011, la distancia de visibilidad de parada que corresponde a dicha velocidad puede obtenerse a partir de la Ecuación 52.

$$D = 0.278 V t + \frac{V^2}{254 \left(\left(\frac{a}{9.81} \right) \pm G \right)} \quad (52)$$

Donde:

D = distancia de parada (m)

V = velocidad (km/h)

t = tiempo de percepción y reacción (s)

a = tasa de deceleración (m/s²)

G = pendiente longitudinal (tanto por uno)

En la formulación anterior, el tiempo de percepción se toma igual a 2,5 s, la velocidad se toma igual a la de operación estimada para el tramo según la metodología propuesta por Pérez et al. (2012), la tasa de deceleración se considera constante e igual a 3,4 m/s² y la pendiente longitudinal es tomada de la restitución del eje llevada a cabo en esta investigación.

La elección de la metodología de estimación de la velocidad de operación estimada por Pérez et al. (2012) se fundamenta en que el tramo sometido a análisis ha formado parte de la muestra que ha dado a lugar al modelo. Su formulación para curvas circulares se expresa en la Ecuación 53.

- Curvas circulares:

$$V_{85} = 106,863 - 60,1185 / e^{0,00422596 \cdot R} \quad (53)$$

Donde

R = radio de la curva circular (m)

- Rectas:

- De longitud inferior a 700 m, la velocidad de operación se obtiene de acuerdo con la Ecuación 54.

$$V_{85} = \sqrt{-1464,72 + 351,28 \cdot \sqrt{L}} \quad (54)$$

Donde

L = longitud de la recta (m)

- Rectas con longitud inferior a 700 metros y radio de la curva anterior menor o igual a 600 metros. La velocidad de operación se estima a partir de las Ecuaciones 55, 56 y 57.

$$V_{85} = 0,362739 \cdot +59,6982 / e^{0,0000472302 \cdot GM} \quad (55)$$

$$V_{85C} = 106,863 - 60,1185 / e^{0,00422596 \cdot R_1} \quad (56)$$

$$GM = \frac{L \cdot (R_1 \cdot R_2)^{0,5}}{100} \quad (57)$$

Donde:

V_{85C} = velocidad de operación en la curva anterior (km/h).

GM = índice geométrico (m²)

L = longitud de la recta (m)

R_1 = radio de la curva anterior (m)

R_2 = radio de la curva posterior (m)

- Rectas con longitud inferior a 700 metros y radio de la curva anterior mayor a 600 metros. La velocidad de operación se obtiene a partir de la expresión de la Ecuación 58.

$$V_{85} = \sqrt{7399,27 + 3,03956 \cdot L} \quad (58)$$

Donde

L = longitud de la recta (m)

- Tasa de deceleración, obtenida a partir de la Ecuación 59.

$$d_{85} = \sqrt{-0,0652071 + \frac{201,74}{R}} \quad (59)$$

Donde

R = radio de la curva (m)

- Tasa de aceleración, obtenida a partir de la Ecuación 60:

$$a_{85} = \frac{1}{-1,49325 + 0,548458 \cdot \ln(R)} \quad (60)$$

Donde

R = radio de la curva (m)

En la Figura 157 y con mayor detalle en el Anexo 7, pueden observarse los resultados de visibilidad disponible y visibilidad requerida según criterios AASHTO (2011) aplicados a la velocidad de operación estimada.

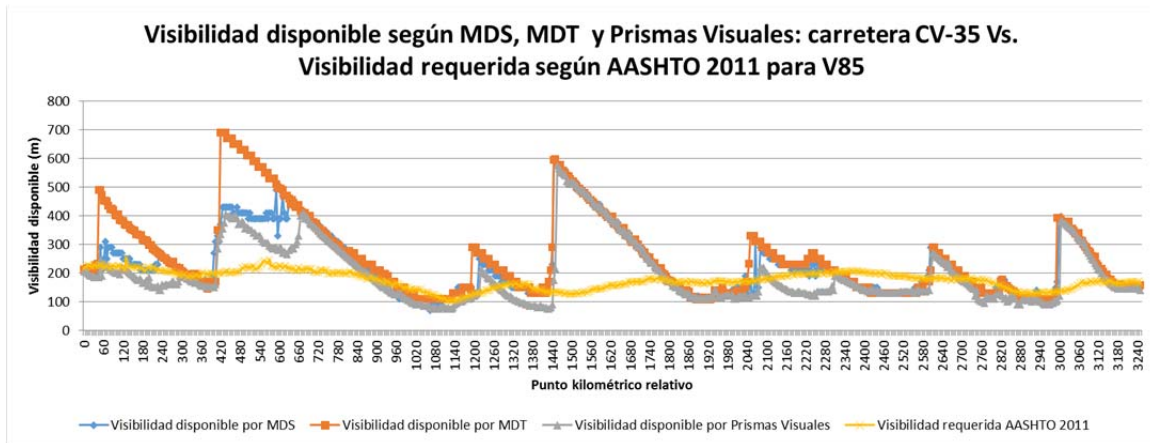


Figura 157: Resultados de visibilidad disponible por MDT, MDS y PV y requerida según metodología AASHTO 2011 para la velocidad de operación V85 estimada (carretera CV-35)

El número de puntos de observación en los que la visibilidad requerida es superior a la visibilidad disponible varía de una forma notable para cada metodología (Figura 158).

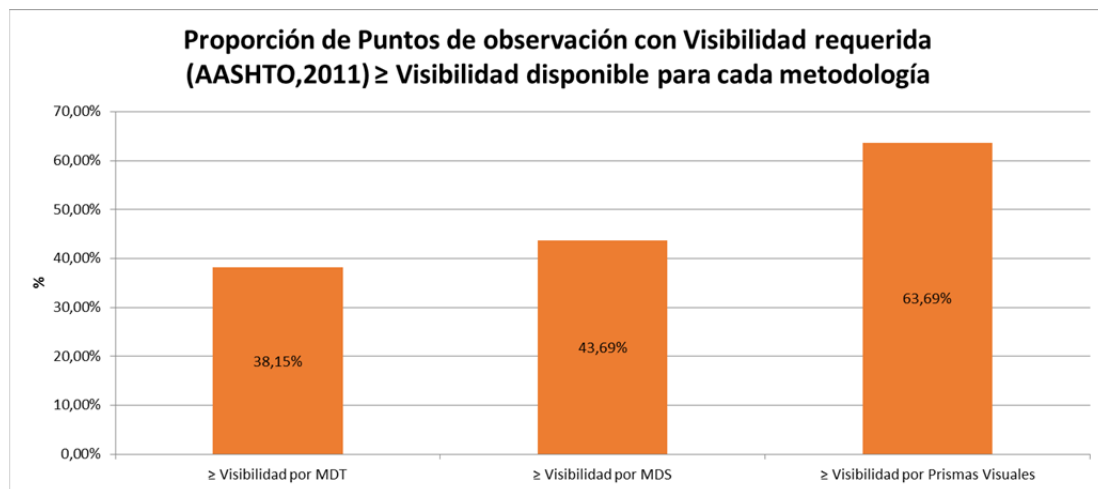


Figura 158: Proporción de puntos de observación con visibilidad requerida para V85 y formulación AASHTO 2011 superior a la disponible para cada metodología (carretera CV-35)

A pesar de que el déficit de visibilidad se encuentra fuertemente condicionado por la velocidad considerada y de que su estimación forma parte de numerosas investigaciones que no son objeto de esta tesis, resulta ilustrativo observar cómo para la velocidad de operación empleada y para el tramo de carretera analizado, la metodología hasta ahora más ampliamente utilizada en el ámbito profesional, basada en MDT y software de diseño, arrojaría un 25,54 % menos de puntos de observación con visibilidad insuficiente que la metodología de prismas visuales, reduciéndose esta diferencia a un 20% si la aplicación se hubiese realizado sobre un MDS.

Esta circunstancia, que evidentemente dependerá de las características geométricas de cada tramo de carretera en estudio, debe alertar sobre las distintas conclusiones que pudieran obtenerse en relación a la seguridad de la maniobra cuando se aplica una u otra metodología.

4.6.2.2 Diferencia entre resultados de visibilidad disponible obtenidos según MDT y según MDS

Tal y como se expuso en apartados anteriores, el modelo digital del terreno (MDT) empleado en esta investigación, es generado a partir de los puntos correspondientes al último rebote del haz láser procedente de un escáner montado sobre un avión (LiDAR aéreo), mientras que el modelo digital de superficies (MDS) considera el primer rebote de dicho haz, por lo que pasa a incluir también puntos correspondientes a objetos en altura no pertenecientes al terreno.

El MDT toma como datos de partida exclusivamente los datos LiDAR aéreo procedentes del PNOA mientras que en el MDS, los datos de partida combinan datos LiDAR terrestre del entorno inmediato de la carretera con los mismos datos LiDAR aéreo procedentes del PNOA que fueron empleados en el MDT fuera de dicho entorno.

La vegetación, por ejemplo, es eliminada del MDT gracias a un cierto grado de permeabilidad al haz láser que permite obtener un cierto número de penetraciones a través de la cobertura vegetal. Los puntos detectados a mayor cota como consecuencia del primer choque de los haces láser que no han penetrado hasta el suelo, constituyen sin embargo, la base del MDS.

Esta forma de proceder, donde no es posible que un mismo punto de cada perfil disponga de dos lecturas de cota diferentes, hace que en el MDS se obtengan perfiles transversales que simulan la vegetación como si de un obstáculo sólido se tratara. Dicho obstáculo se extiende a toda la dimensión en planta ocupada por la cubierta de esa vegetación (Figura 159). Dada esta forma de proceder, en este caso no existe, por ejemplo, posibilidad de visión bajo la copa de un árbol que sobrevuela la calzada.

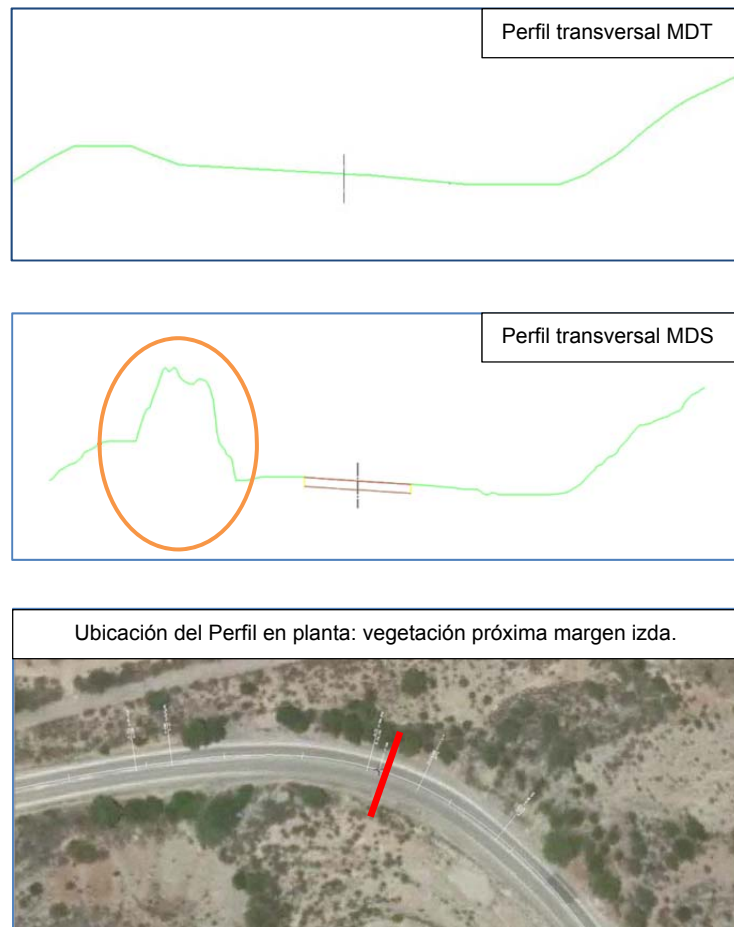


Figura 159: Vista de un perfil transversal obtenido a partir de MDT y de MDS con presencia de vegetación arbórea en su margen izquierda (P.K. 1+100, Carretera CV35).

Como en el MDS se contemplan también otros obstáculos, dependiendo de los datos empleados en su generación (LiDAR aéreo o LiDAR mobile) el modelo puede incluir también instalaciones próximas a la carretera tales como sistemas de contención, muros o señalización (Figura 160).

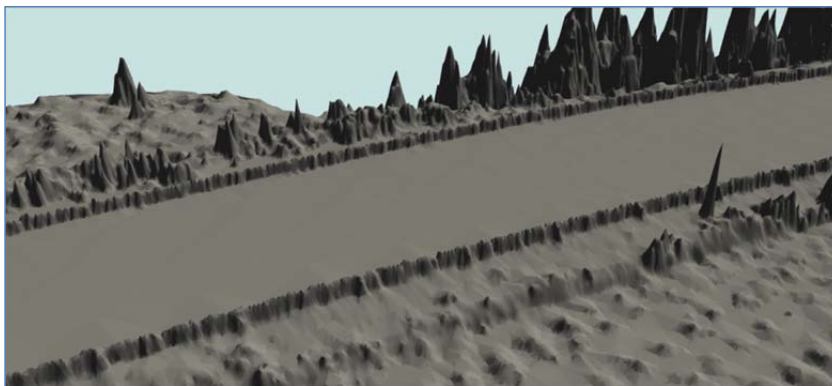
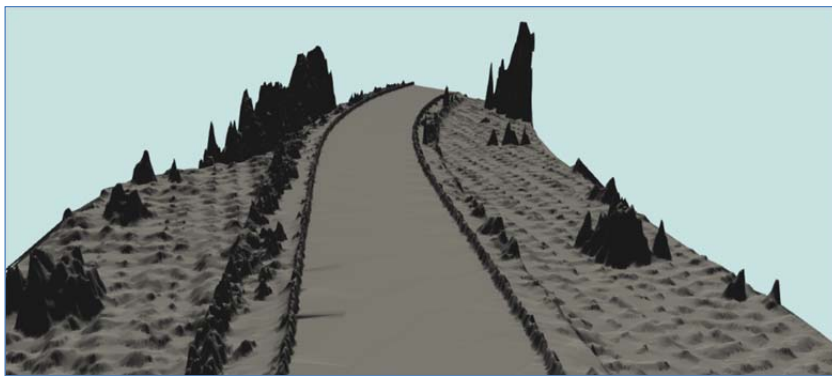
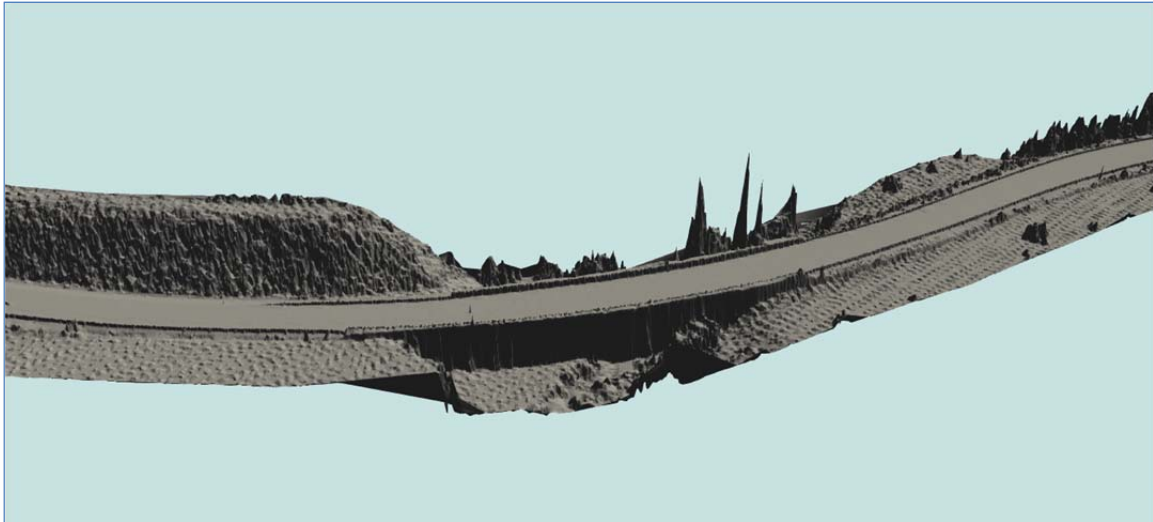


Figura 160: Carretera CV-35. Modelo tridimensional generado a partir del MDS donde pueden observarse los sistemas de contención junto a la plataforma (Clip Windows)

En la Figura 161 puede observarse el grado de detalle obtenido con el MDS apreciándose incluso el abatimiento a tierra de una barrera metálica y los postes de sustentación de la bionda en la margen opuesta.



Figura 161: Carretera CV-35. Detalle alcanzado en el modelo tridimensional generado a partir del MDS donde se aprecia el abatimiento a tierra de una barrera de seguridad (Clip Windows)

A diferencia de lo que ocurre con la vegetación donde se producen varios rebotes a diferente altura, para la generación de un MDT los puntos que presentan un único rebote sobre objetos que no pertenecen al terreno natural, tales como estructuras o edificaciones, necesitan además un filtrado que ha sido llevado a cabo manualmente y mediante el apoyo de fotografías aéreas.

El MDS, sin embargo, combina datos Lidar tanto aéreos como mobile, por lo que dispone de un mayor detalle en la localización de obstáculos ubicados en el entorno inmediato de la carretera siempre que estos sean visibles desde el sistema de escaneo láser.

En las Figuras 162 y 163 pueden observarse las visibilidades obtenidas en la totalidad del tramo analizado y en sus primeros 500 m. En el primer caso, la escala de representación provoca una aparente coincidencia general de resultados en gran parte del trazado. En el segundo caso sin embargo, pueden apreciarse diferencias notables entre ambos.

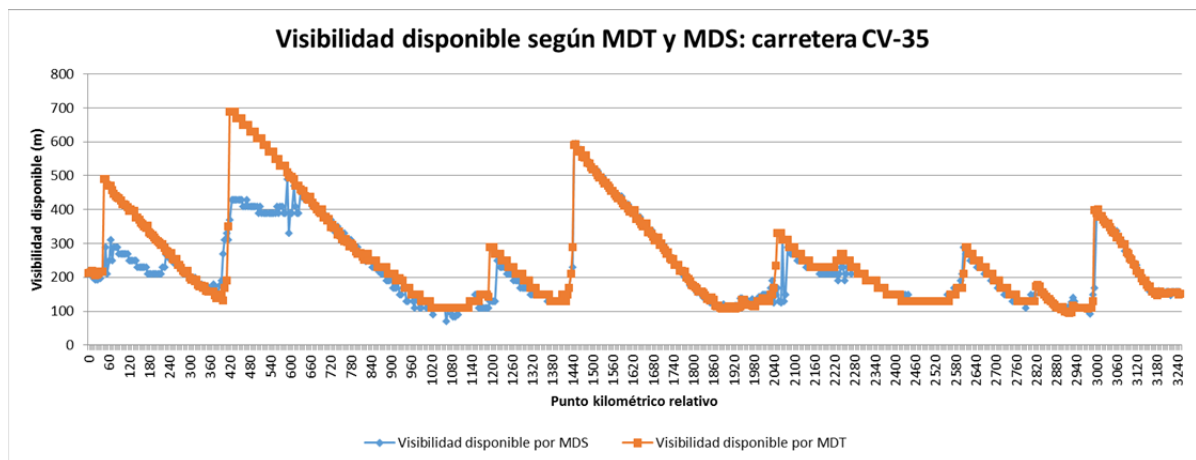


Figura 162: Visibilidades disponibles obtenidas mediante software de diseño aplicado a MDT y a MDS (carretera CV-35)

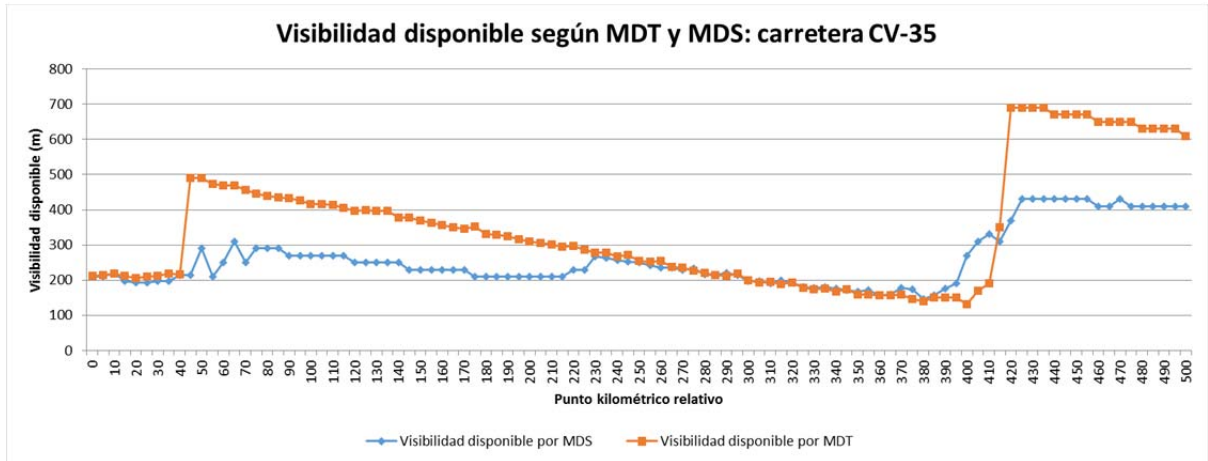


Figura 163: Visibilidades disponibles obtenidas mediante software de diseño aplicado a MDT y a MDS entre el 0+000 y el 0+500 (carretera CV-35)

Con el fin de cuantificar dichas diferencias, en el Anexo 3 se incluyen los gráficos que las representan cuando las distancias de visibilidad disponible son obtenidas por aplicación de ambos modelos a software comercial de diseño.

Estas diferencias muestran valores de magnitud variable, desde 0 hasta 320 m, lo que supone en algunos casos diferencias de resultados muy notables (Figura 164). La visualización tridimensional conjunta de MDT, nube de puntos y PV permite analizar los obstáculos a la visión detectados en uno y otro caso en estos tramos. Todos ellos se producen por la presencia de vegetación de porte variable en el entorno de la carretera así como por muretes y barreras de protección. Un ejemplo de esta casuística puede observarse en la Figura 165.

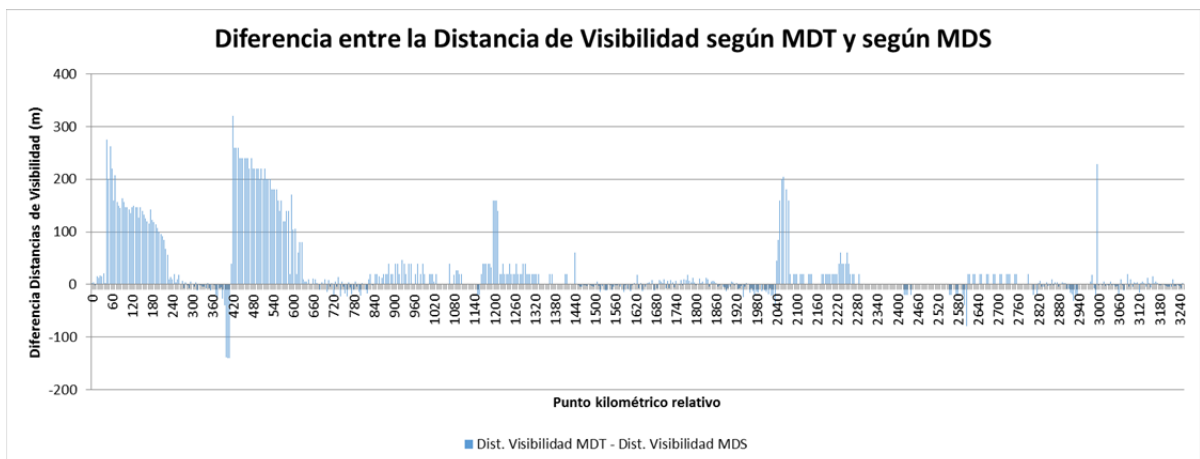


Figura 164: Diferencia entre las distancias de visibilidad obtenidas por MDT y por MDS (carretera CV35)

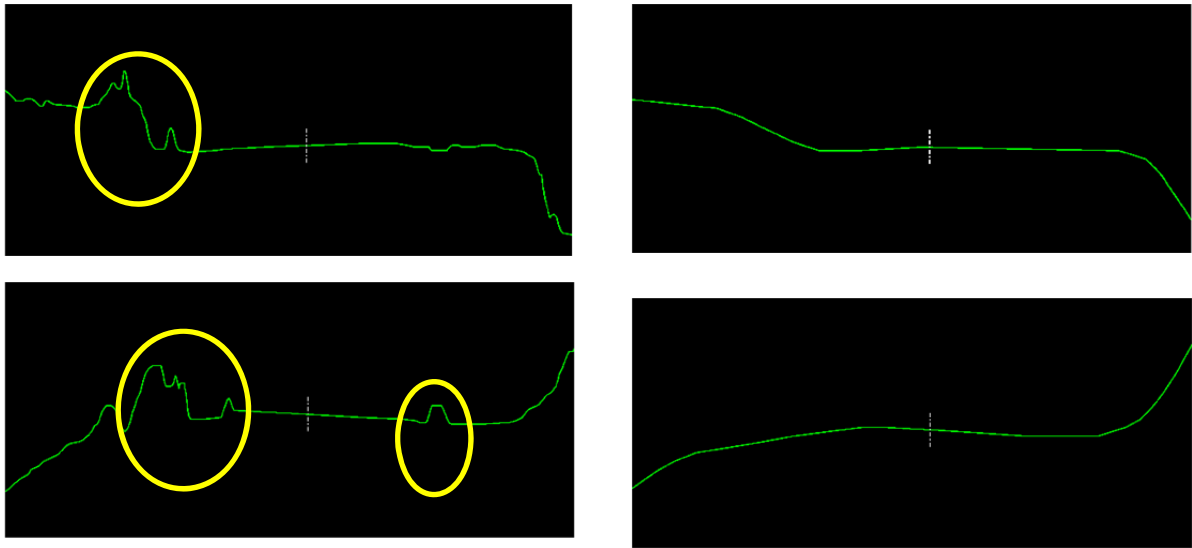


Figura 165: Perfiles transversales obtenidos de MDS (izquierda, donde puede observarse vegetación y sistemas de contención) y de MDT (derecha) de los mismos puntos kilométricos.

En principio, dado que el MDS refleja además del terreno, toda una serie de obstáculos adicionales que no son considerados en el MDT, cabría pensar que todas las distancias de visibilidad disponible serán iguales o inferiores a los valores obtenidos por MDT (Figura 166).

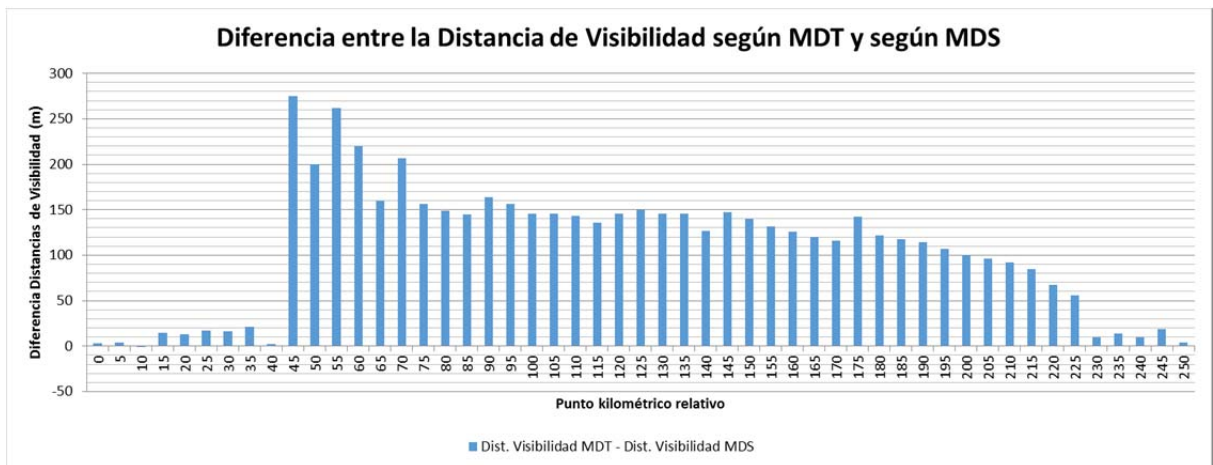


Figura 166: Tramo de la CV-35 analizada en el que la visibilidad disponible por MDT es superior a la obtenida por MDS

Sin embargo, el análisis de los resultados muestra que en el tramo de carretera analizado, existen estaciones en las que la visibilidad disponible por MDS es superior a la obtenida a partir de MDT (Figura 167).

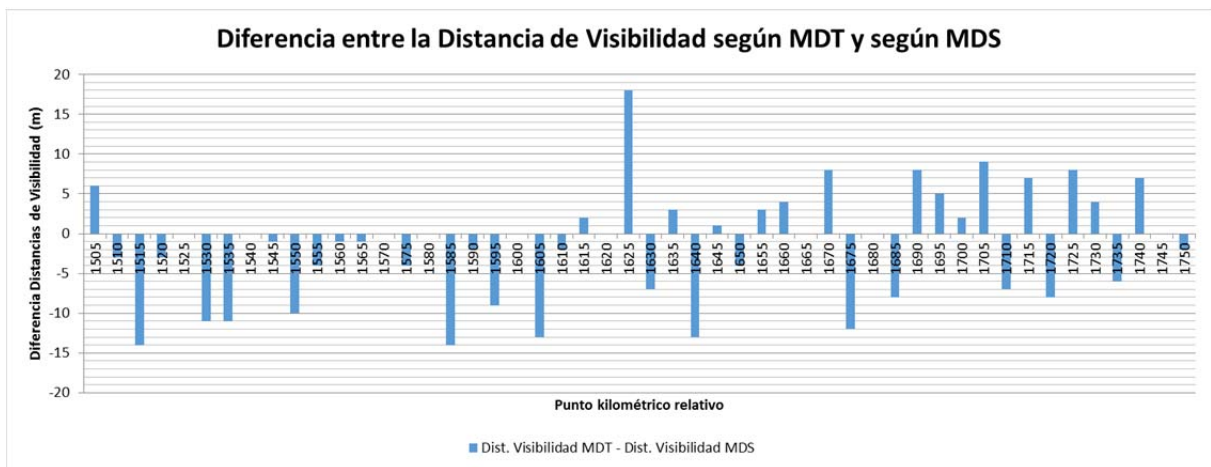


Figura 167: Tramo de la CV-35 analizada en el que existen estaciones de observación en las que la visibilidad disponible por MDS es superior a la obtenida por MDT

La visibilidad por MDT es superior a la visibilidad por MDS en el 74,65% de los resultados, pero existe un 25,35% de estaciones de observación en que la mayor distancia de visibilidad corresponde al MDS (Figura 168).

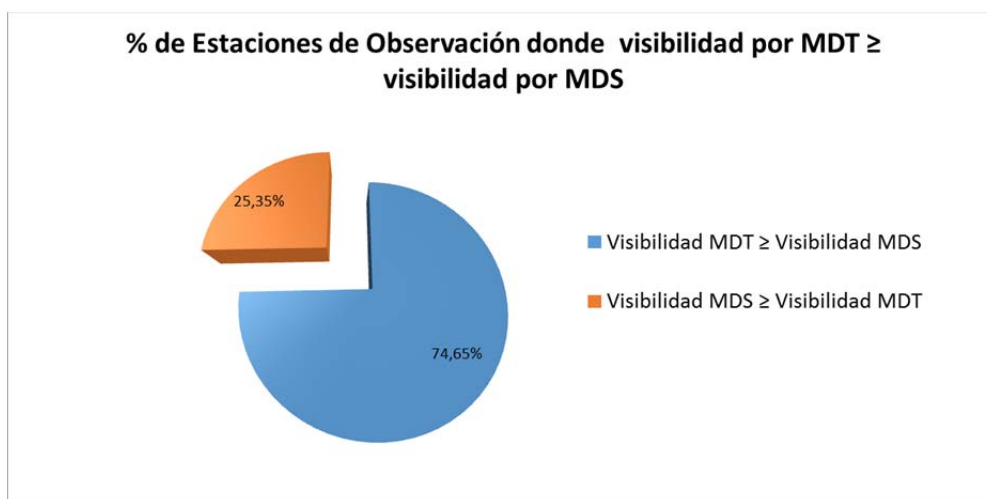


Figura 168: Porcentaje de estaciones de observación en los que la visibilidad disponible según MDT es mayor o menor que por MDS (carretera CV-35)

Un análisis pormenorizado de las estaciones en las que la visibilidad por MDS es superior a la visibilidad disponible por MDT muestra las siguientes diferencias:

- Para alturas de punto de vista del observador de 1,08 m y del objetivo de 0,60 m, diferencias de cota de la rasante que oscilan entre 0,001 y 0,54 m tienen incidencia en los resultados de visibilidad obtenidos, tanto en presencia de acuerdos verticales como en rasantes rectas, observándose diferencias no homotéticas (Figuras 169 y 170). Esta diferencia de cota se debe a la precisión absoluta de cada uno de los dos sistemas de adquisición de datos, Lidar aéreo y Lidar mobile empleados en la generación de los modelos así como al propio proceso de interpolación y curvado.
- Cuando las diferencias entre ambos sistemas se produce en curvas en planta en presencia de taludes de desmonte situados en el interior de las curvas, a las diferencias de cota anteriores se añade el hecho de que los perfiles transversales muestran distintos retranqueos de taludes para cada modelo para el mismo incremento de cota sobre rasante, lo que modifica el despeje disponible haciendo intervenir además, las diferencias de posicionamiento de puntos en planta entre los datos empleados en cada uno de los dos modelos (Figura 171).

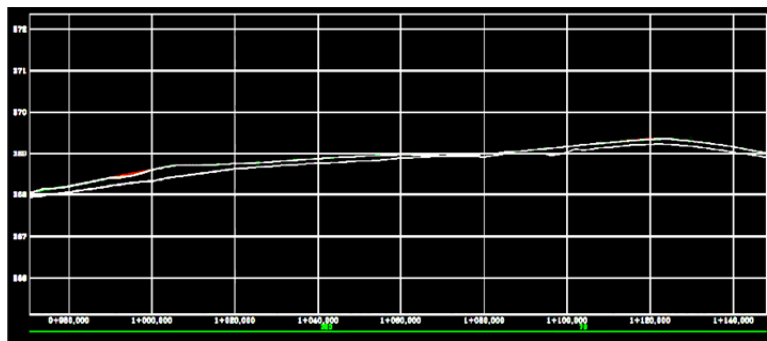


Figura 169: Perfil longitudinal con las dos rasantes obtenidas por MDT y MDS (carretera CV-35)

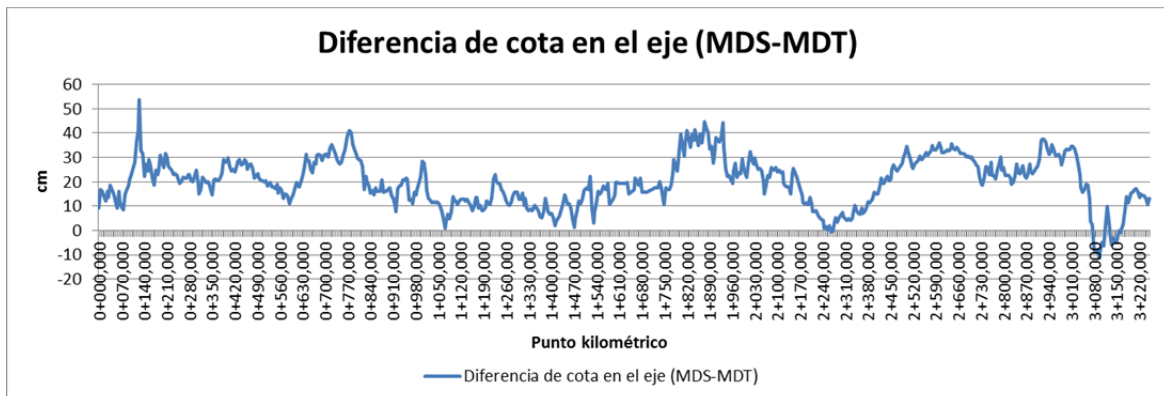


Figura 170: Diferencia de cota en el eje entre la rasante ajustada al MDS y la ajustada al MDT (carretera CV-35)

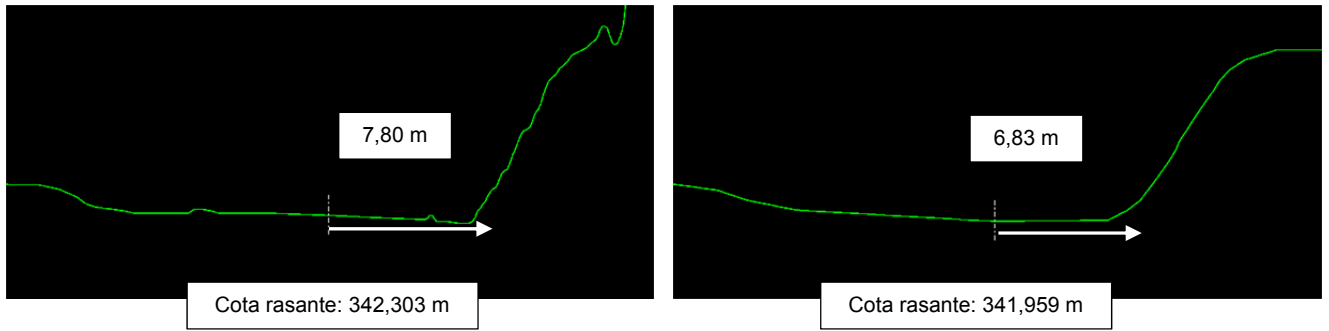


Figura 171: Perfiles Transversales según MDS (izquierda) y según MDT (derecha) del mismo punto kilométrico (p.k. relativo 2+500, carretera CV-35)

De acuerdo con los resultados anteriores, la mayor precisión y detalle obtenidos en el MDS lo hace preferible al empleo del MDT, disminuyendo la visibilidad realmente disponible en la mayoría del trazado, pero también ampliándola en algunos casos.

La magnitud de las diferencias obtenidas puede observarse en la Figura 172 donde, por ejemplo, un 45,01% del total de estaciones de observación difieren en más de 10 m entre las dos metodologías, un 12,44% lo hace en más de 100 m y un 7,37% en más de 150 m. Estos valores y proporciones ponen de manifiesto la inconveniencia de dejar el análisis de visibilidad en manos exclusivamente de los tradicionales MDT, tanto si éstos proceden de cartografías convencionales, como si lo hacen de escaneados LiDAR.

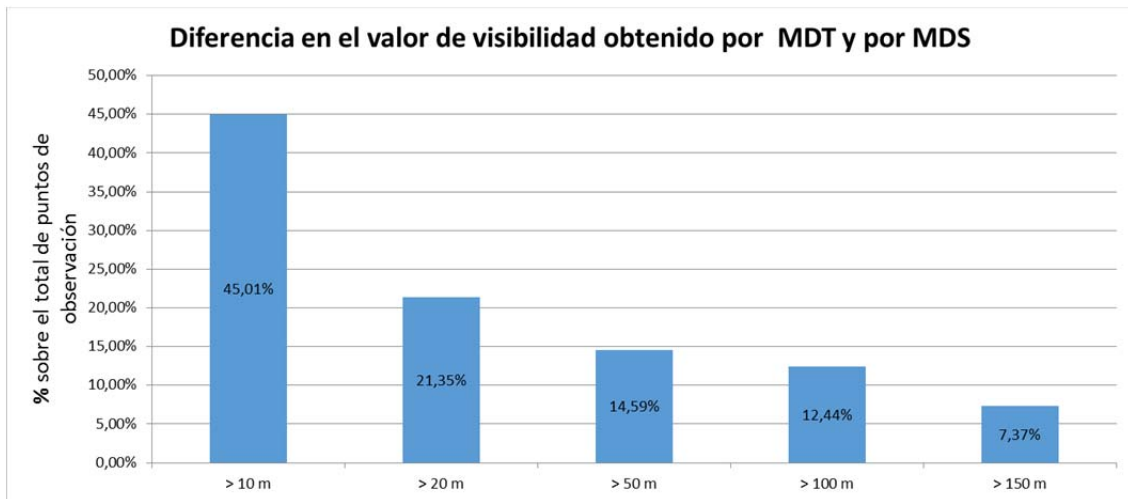


Figura 172: Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad obtenido a partir de MDT y el obtenido a partir de MDS supera un determinado valor (carretera CV-35)

En el caso analizado, cuando la visibilidad por MDS es superior a la visibilidad por MDT, la mayor parte de las diferencias se encuentran por debajo de los 10 m (61,82% del

total de casos en los que se ha detectado esta circunstancia) y un 27,88% entre los 10 y los 20 m (este caso supone un 5,99% del total de estaciones de observación). Diferencias superiores a los 50 m se reducen al 10,30% de los casos en los que la visibilidad por MDS es mayor que la visibilidad por MDT (0,61% del total de puntos de observación), siendo prácticamente despreciables los casos que suponen diferencias de 100 m o más (Figura 173).

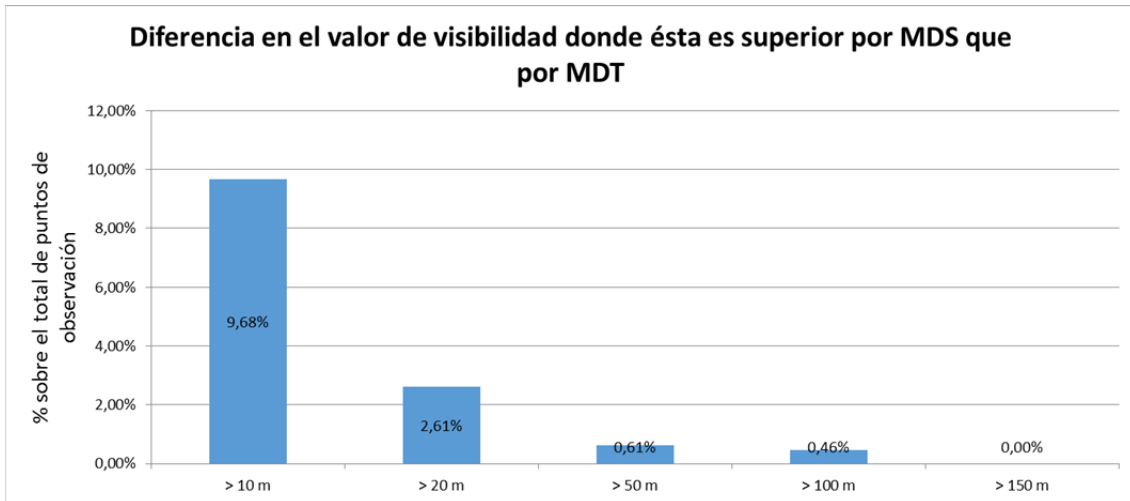


Figura 173: Visibilidad por MDS > Visibilidad por MDT. Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad es superior a un determinado valor (Carretera CV-35)

En términos globales, el error cuadrático medio (ECM) es en este caso, igual a 4426,95 m², siendo $\sqrt{ECM} = 66,95 \text{ m}$.

Un gráfico de frecuencias acumuladas permite interpretar con mayor precisión el resultado de ECM anterior (Figura 174).

En él puede observarse que a pesar de que un elevado porcentaje de puntos de observación arrojan diferencias inferiores a los 20 m, las elevadas diferencias de visibilidad presentes en el resto de casos elevan considerablemente el valor final del ECM. Las frecuencias acumuladas sufren variaciones irregulares propias del fenómeno observado y de los obstáculos presentes en el entorno de la carretera.

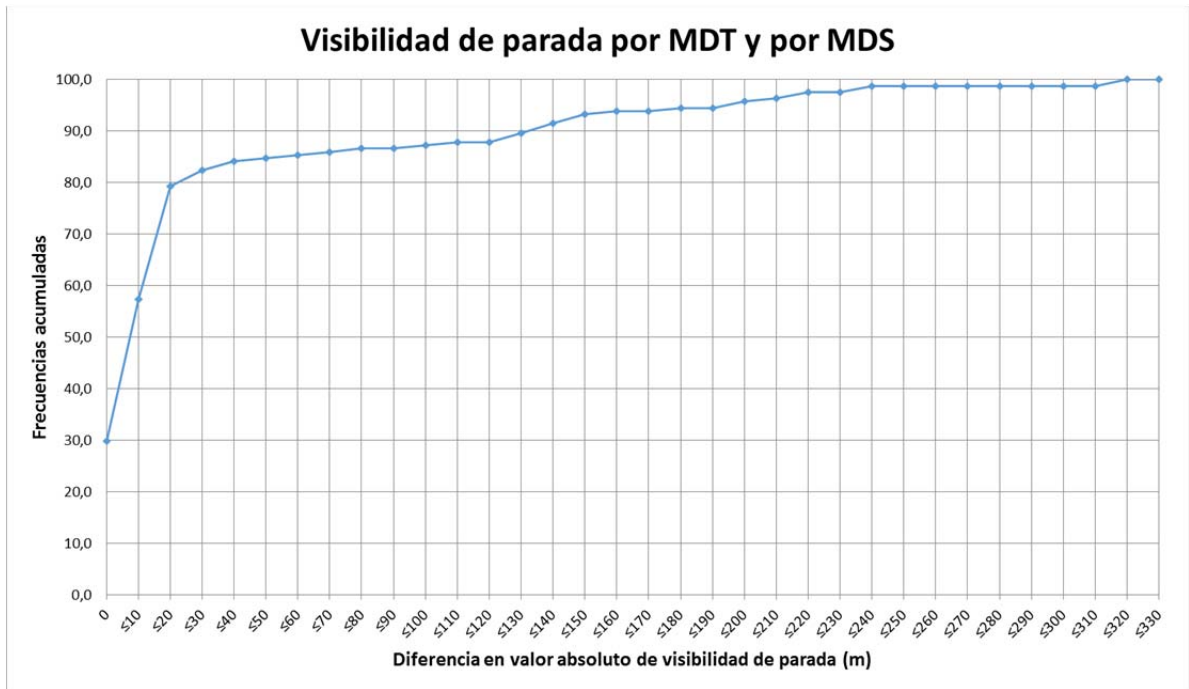


Figura 174: Gráfico de frecuencias acumuladas para diferencias de visibilidad obtenidas por MDT y MDS (Carretera CV-35)

4.6.2.3 Diferencia entre resultados de visibilidad disponible obtenidos según Modelo Digital del Terreno (MDT) y PV

La nube de puntos LiDAR mobile contempla el posicionamiento de miles de puntos pertenecientes al entorno inmediato de la carretera con precisión centimétrica, mientras que el MDT constituye una simplificación de la realidad circundante que considera solo aquellos puntos procedentes de LiDAR aéreo que previsiblemente pertenecen al terreno, y que además cuentan con precisiones inferiores a los datos mobile, con errores absolutos métricos en planimetría y decimétricos en altura.

La metodología basada en el uso de software de diseño aplicado a un Modelo Digital del Terreno (MDT) generado a partir de datos LiDAR aéreo es completamente diferente a la metodología de Prismas Visuales (PV) directamente aplicada a la nube de puntos LiDAR mobile, tanto por la génesis de los datos de partida, como por el sistema de obtención de visuales, por lo que son también esperables notables diferencias en los resultados de visibilidad obtenidos.

En principio, de la consideración de un mayor número de obstáculos de forma más precisa, podrían esperarse unas distancias de visibilidad siempre inferiores por la metodología de PV que por el empleo de un MDT, siendo precisamente objeto de este apartado, analizar e interpretar con detalle las diferencias obtenidas así como confirmar o no las hipótesis inicialmente planteadas.

En el Anexo 4 se incluyen los gráficos que representan la diferencia de visibilidad obtenida por aplicación de ambos modelos. Dichas diferencias muestran valores de magnitud variable desde 0 hasta 420 m, lo que también supone en algunos casos diferencias muy notables (Figura 175). La visualización tridimensional conjunta de MDT, nube de puntos y PV permite de nuevo detectar los obstáculos a la visión localizados en uno y otro caso en estos tramos. Todos ellos se producen por la presencia de vegetación de porte variable en el entorno de la carretera así como por muretes y barreras de protección. Un ejemplo de esta casuística puede observarse en la Figura 176.

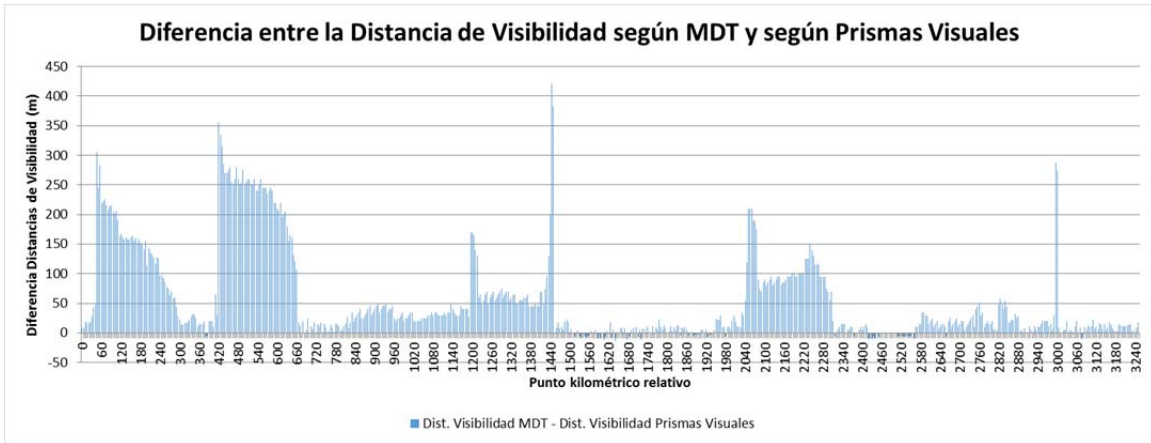


Figura 175: Diferencia entre las distancias de visibilidad obtenidas por MDT y por PV (carretera CV35)

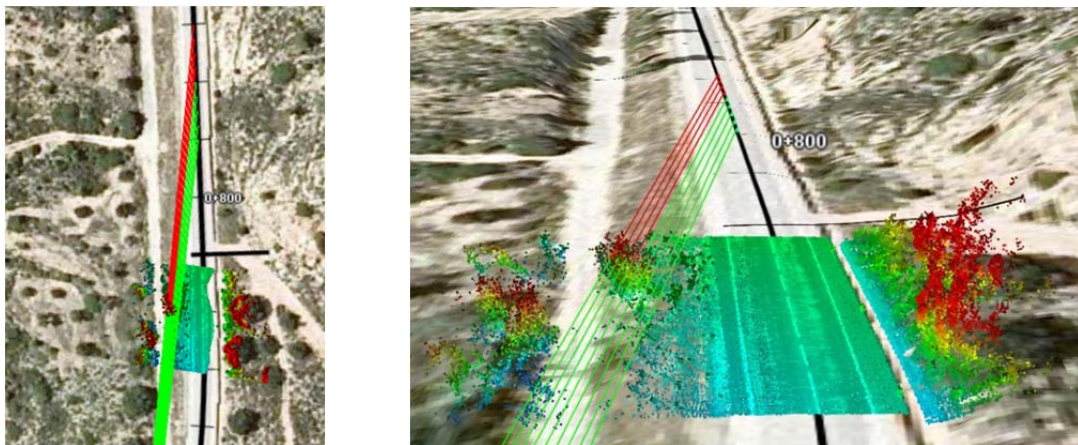


Figura 176: Ejemplo de obstáculos localizados en la metodología de PV que no están presentes en el MDT (Carretera CV-35. Nasa World Wind)

Los valores de visibilidad son mayoritariamente superiores para la metodología que se aplica sobre MDT (Figuras 177 y 178); sin embargo, existe un número de casos en los que los valores de visibilidad por MDT son inferiores a los obtenidos por la metodología de prismas visuales (PV) (Figura 178).

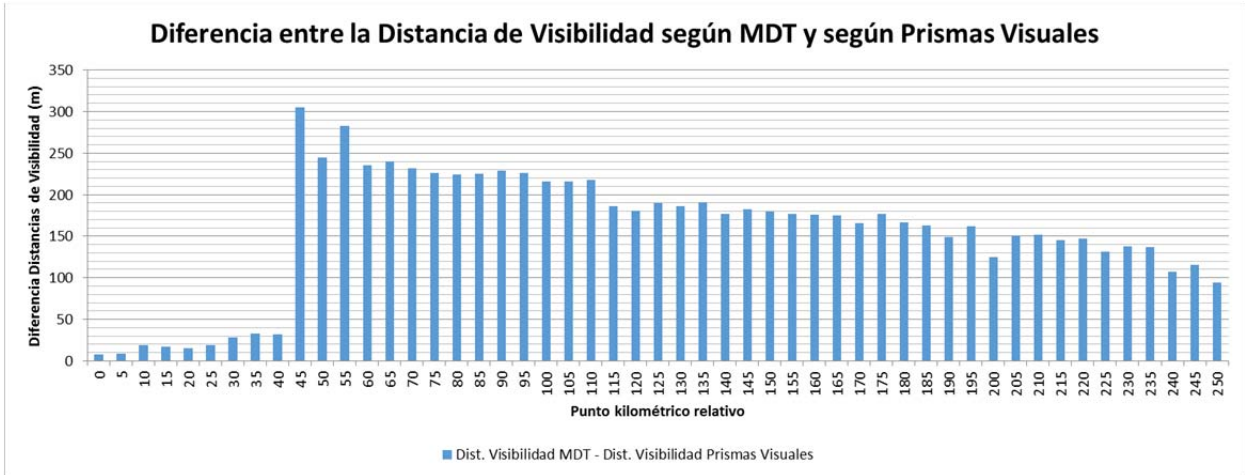


Figura 177: Tramo de la CV-35 analizada en el que la visibilidad disponible por MDT es superior a la obtenida por PV (carretera CV-35)

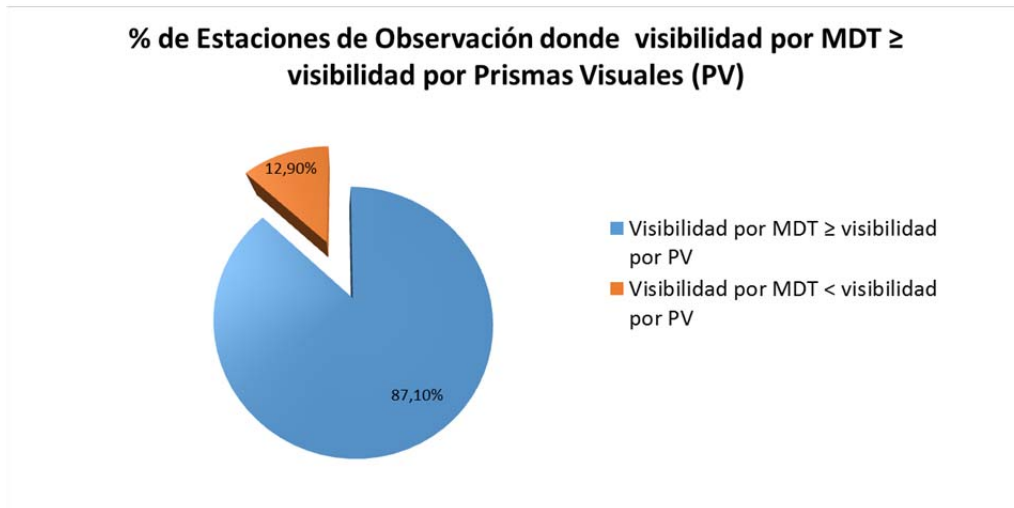


Figura 178: Porcentaje sobre el total de puntos de observación en los que la visibilidad disponible según MDT es mayor o igual que por PV (carretera CV-35)

En la Figura 179 puede observarse un tramo de la carretera analizada donde varias estaciones muestran una visibilidad por MDT superior a la obtenida por PV. En todos los casos en los que se da esta circunstancia (12,90% del total), las diferencias son inferiores a los 14 m, debiendo además tenerse en cuenta que el fraccionamiento de la carretera llevado a cabo para medir visuales por PV, es de 5,0 m. Éste es el error máximo que puede ser introducido en los resultados como consecuencia exclusivamente de la forma adoptada para realizar la medición según esta metodología.

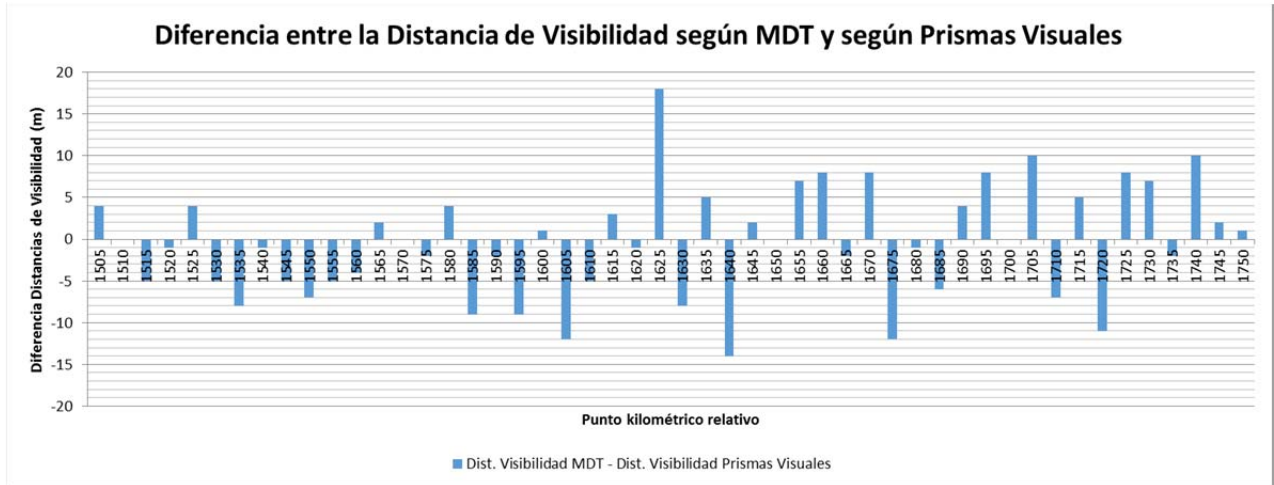


Figura 179: Tramo de la CV-35 en el que existen estaciones donde la visibilidad disponible por Prismas Visuales es superior a la obtenida por MDT

Los resultados vuelven a poner de manifiesto lo observado al analizar las diferencias entre las visibilidades obtenidas por MDT y por MDS, de hecho, en el 79,76% de las estaciones en las que la visibilidad por MDS resulta superior a la visibilidad por MDT, también lo es la visibilidad por PV. En la Figura 180 pueden observarse ambas diferencias en un tramo de la carretera CV-35.

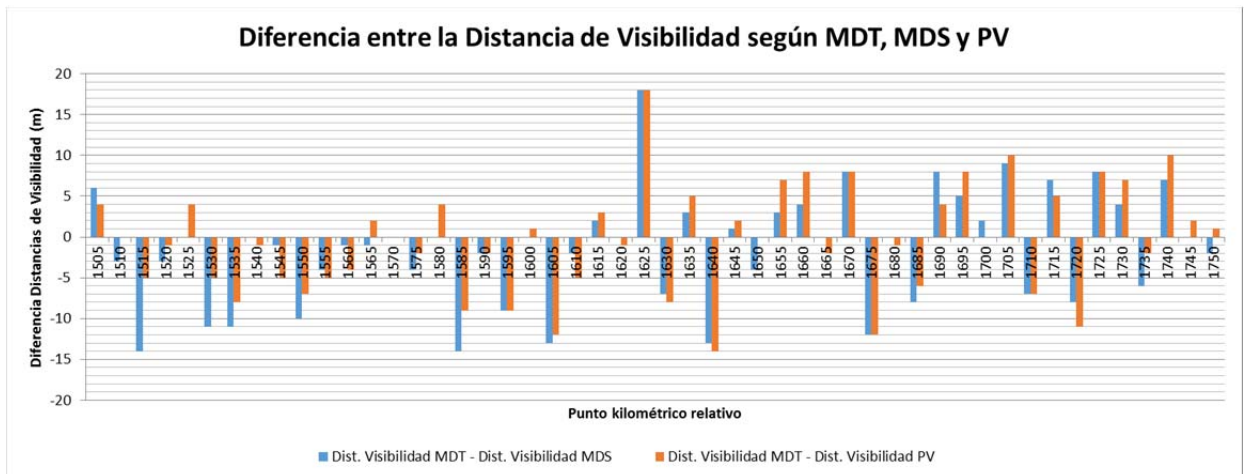


Figura 180: Tramo de la CV-35 en el que se muestra la coincidencia de estaciones en las que las diferencias entre la visibilidad por MDT y la visibilidad por MDS y PV, comparten mayoritariamente signo y orden de magnitud

Esta circunstancia se debe de nuevo al tipo de datos de origen LiDAR mobile empleado tanto en la generación del MDS, como en la aplicación de PV. La precisión centimétrica frente a las precisiones métrica en planimetría, y decimétrica en altimetría de

los datos LiDAR aéreo, vuelven a generar distorsiones en los resultados del MDT asociables tanto a la posición de taludes en el interior de las curvas, como a la cota de la calzada registrada en cada caso.

En la Figura 181 se representan las diferencias de visibilidad obtenidas por MDT con las obtenidas tanto por MDS como por PV para todo el tramo de carretera analizado. En la mayoría de estaciones la diferencia entre las visibilidades disponibles es mayor en el caso de PV que en el caso de aplicación del MDS. Existen no obstante estaciones en las que no se cumple lo anterior.

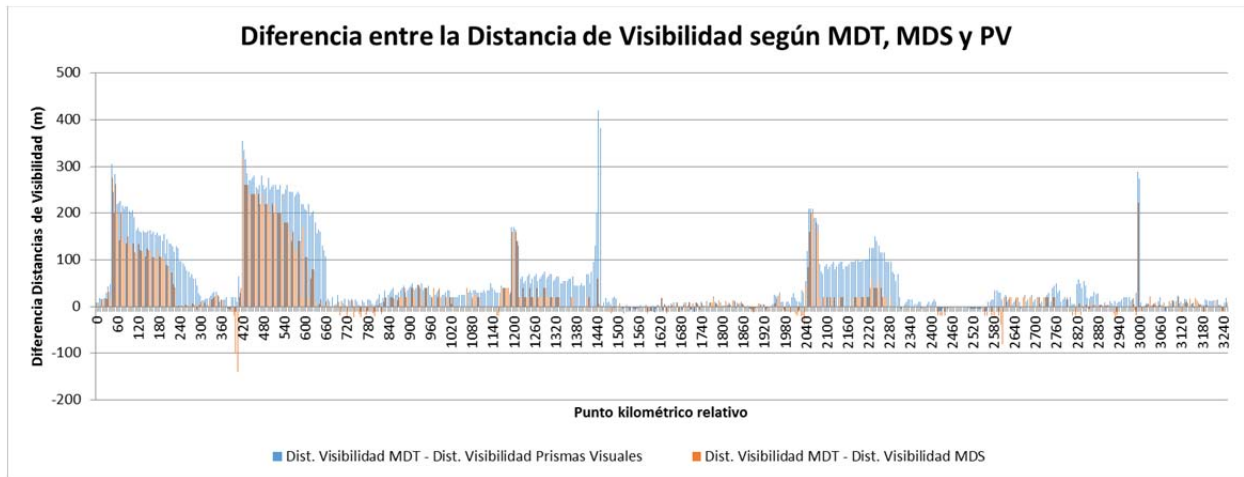


Figura 181: Diferencia entre la visibilidad obtenida por MDT con la obtenida por MDS y por PV (Carretera CV-35)

Esta circunstancia pone de manifiesto que el mayor número y detalle con que son representados los obstáculos que impiden la visión en la metodología de PV, hacen que el empleo del MDT se encuentre sobreestimando la visibilidad disponible en la mayoría del trazado, y que esto también se produzca incluso cuando se aplica la metodología basada en MDS.

La magnitud de las diferencias obtenidas puede observarse en la Figura 182, donde un 63,59% de las estaciones de observación difieren en más de 10 m entre las dos metodologías, un 17,97% lo hace en más de 100 m y un 14,13% en más de 150 m. Todos estos porcentajes son superiores a los obtenidos cuando se comparan las diferencias de resultados entre las metodologías basadas en MDT y en MDS, lo que resulta coherente con el hecho de que mayoritariamente, la metodología de PV sea la de resultados de visibilidad más restrictivos.

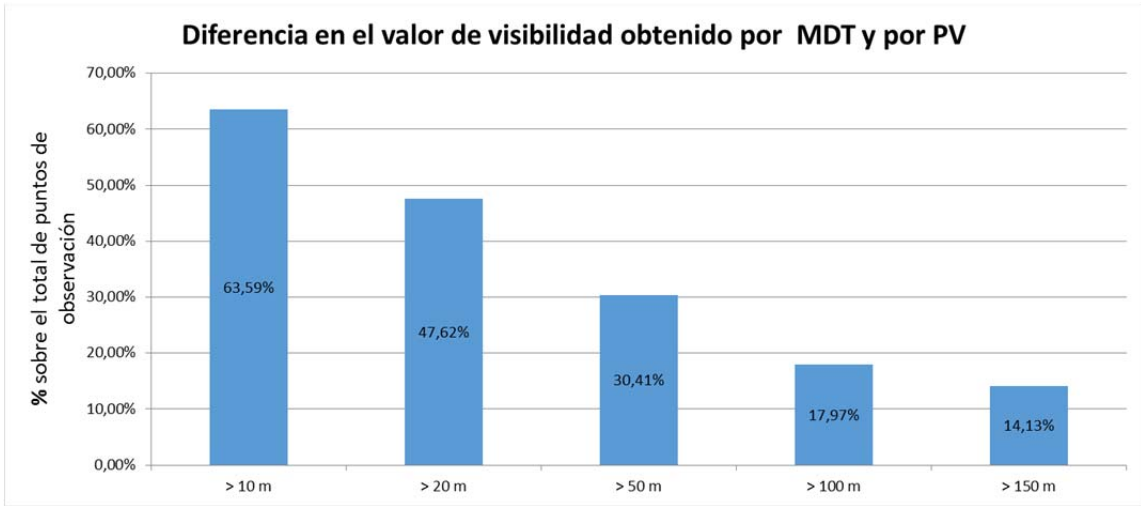


Figura 182: Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad obtenido a partir de MDT y a partir de PV supera un determinado valor (carretera CV-35)

Estos valores y proporciones ponen de nuevo de manifiesto la inconveniencia de dejar el análisis de visibilidad en manos exclusivamente de los tradicionales MDT, ya sea procedentes de cartografías convencionales, o de escaneados LiDAR.

Cuantificar la diferencia entre los resultados de visibilidad disponible por PV, en comparación con la obtenida por MDT cuando los primeros son mayores que los segundos, resulta asimismo de interés para acotar esta circunstancia (Figura 183). En el caso analizado, la mayor parte de las diferencias son inferiores a los 10 m (84,71% de los casos en los que $Visib.PV > Visib.MDT$) encontrándose el resto (15,29%) entre los 10 y los 20 m.

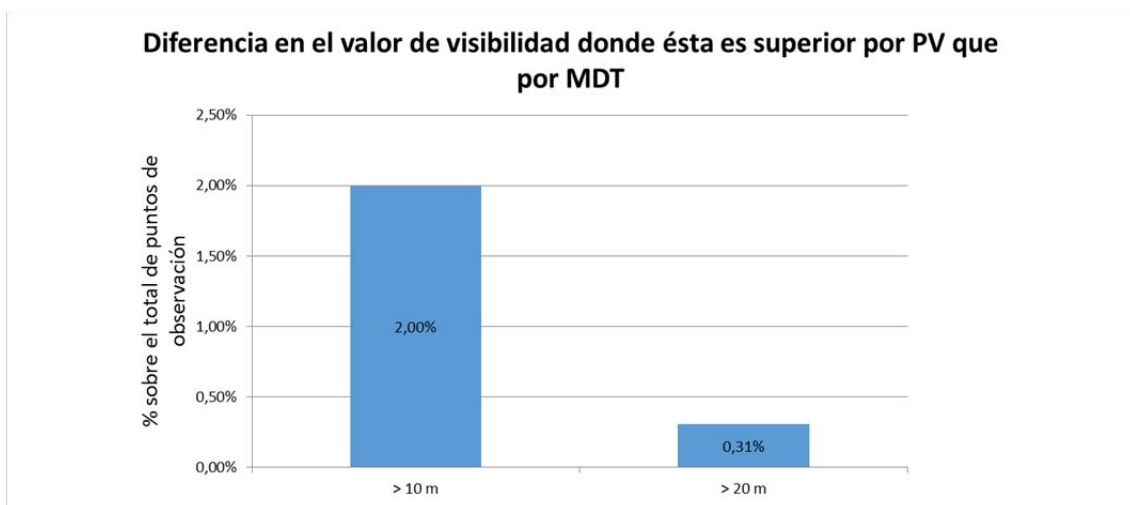


Figura 183: Visibilidad por PV > Visibilidad por MDT. Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad es superior a un determinado valor (carretera CV-35)

En términos globales, el error cuadrático medio (ECM) es en este caso, igual a 9024,59 m², siendo $\sqrt{ECM} = 96,86 \text{ m}$.

En la figura 184 puede observarse el gráfico de frecuencias acumuladas para las diferencias de visibilidad obtenidas por una y otra metodología.

En él puede observarse un notable incremento en el número de puntos de observación donde los valores de diferencia de visibilidad toman valores altos, elevando el valor final del ECM lo que es representativo de que existen importantes diferencias en los resultados obtenidos por una y otra metodología.

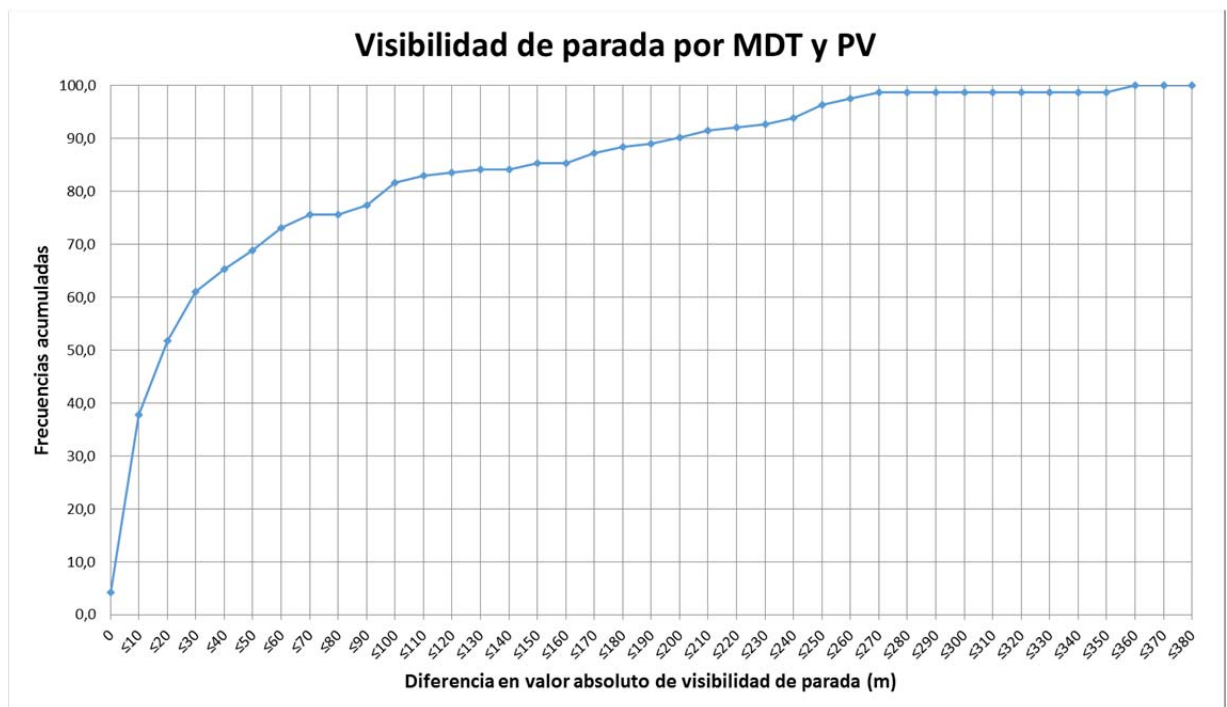


Figura 184: Gráfico de frecuencias acumuladas para diferencias de visibilidad obtenidas por MDT y PV (Carretera CV-35)

4.6.2.4 Diferencia entre resultados de visibilidad disponible obtenidos según MDS y según PV

A diferencia de las comparativas anteriores (MDT con MDS, y MDT con PV), en el entorno más inmediato de la carretera, tanto el MDS, como la metodología de PV, emplean como datos de origen los puntos procedentes del escaneado LiDAR mobile. La precisión planimétrica y altimétrica de dichos puntos es por tanto, la misma en ambos casos. Donde no existen datos LiDAR mobile, el modelo que emplea un MDS toma la información de datos LiDAR aéreo del PNOA-IGN directamente de sus ficheros *.las*, mientras que en la metodología de PV en estas zonas no existirán obstáculos que interrumpen la visión.

Tal y como se expresó en epígrafes anteriores, el MDS se obtiene mediante rasterización y consideración de la cota correspondiente a los puntos de mayor altura presentes en el escaneado láser. Para la obtención de las distancias de visibilidad disponible, el curvado resultante del MDS se aplica al software comercial de diseño de referencia, mientras que el modelo de PV emplea directamente la nube de puntos LiDAR sin que se lleve a cabo ningún proceso de modelización previo (Figura 185).

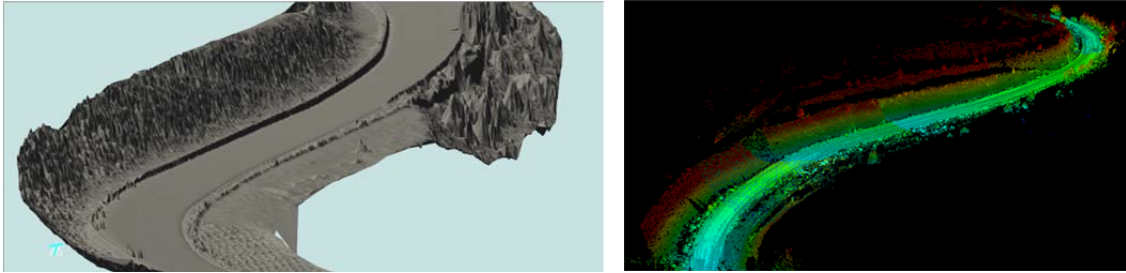


Figura 185: Carretera CV-35. MDS (izquierda) y nube de puntos LiDAR mobile (derecha)

En el modelo que emplea MDS y software de diseño no es posible que un mismo punto de cada perfil transversal disponga de dos lecturas de cota diferentes, por lo que obstáculos tales como la vegetación, son simulados como si de un obstáculo sólido emergente del terreno se tratara, dicho obstáculo se extiende en su base a toda la dimensión en planta ocupada por la cubierta de esa vegetación. En este modelo no existe, por tanto, posibilidad de visual bajo la copa de un árbol que sobrevuele la calzada por ejemplo.

Asimismo, aunque con las precisiones propias de cada metodología, ambos modelos representan otros obstáculos presentes en el entorno más próximo a la carretera como pueden ser sistemas de protección, muretes o señalización.

En el Anexo 5 se incluyen los gráficos que representan la diferencia de visibilidad obtenida por aplicación de ambos modelos al tramo de carretera analizado.

Las diferencias muestran valores de magnitud variable, desde 0 hasta 415 m, lo que supone que en algunos casos esta diferencia toma valores muy altos (Figura 186).

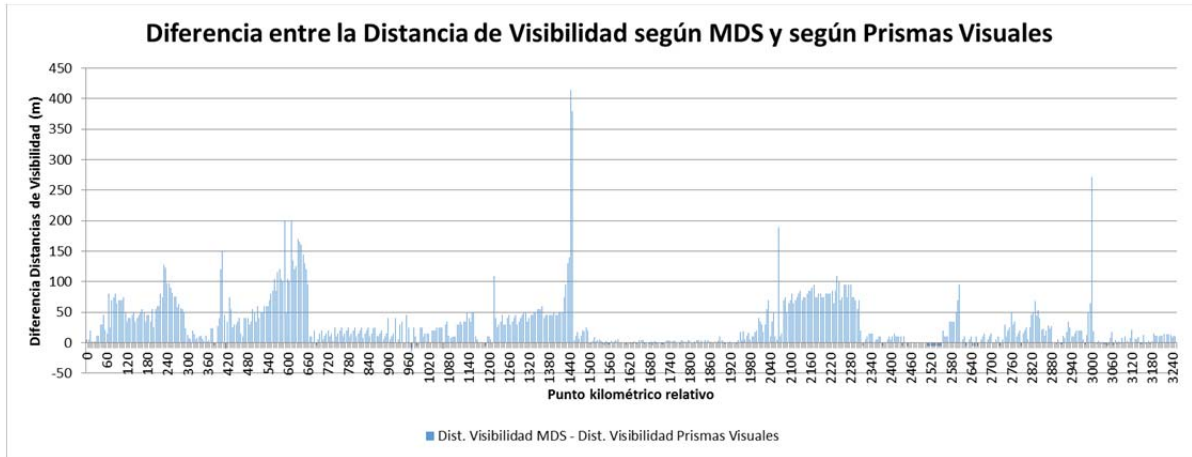


Figura 186: Diferencia entre las distancias de visibilidad obtenidas por MDS y por PV (carretera CV35)

Al igual que en el estudio comparativo MDT-PV, un análisis detallado de las estaciones donde las diferencias entre ambas metodologías toma los valores más altos, muestra que obstrucciones a la visión provocadas por obstáculos de pequeñas dimensiones, fundamentalmente vegetación y sistemas de contención, provocan interrupciones de visibilidad que no han sido consideradas ni en la metodología que emplea MDT y software de diseño, ni tampoco en la que emplea MDS (Figura 187).

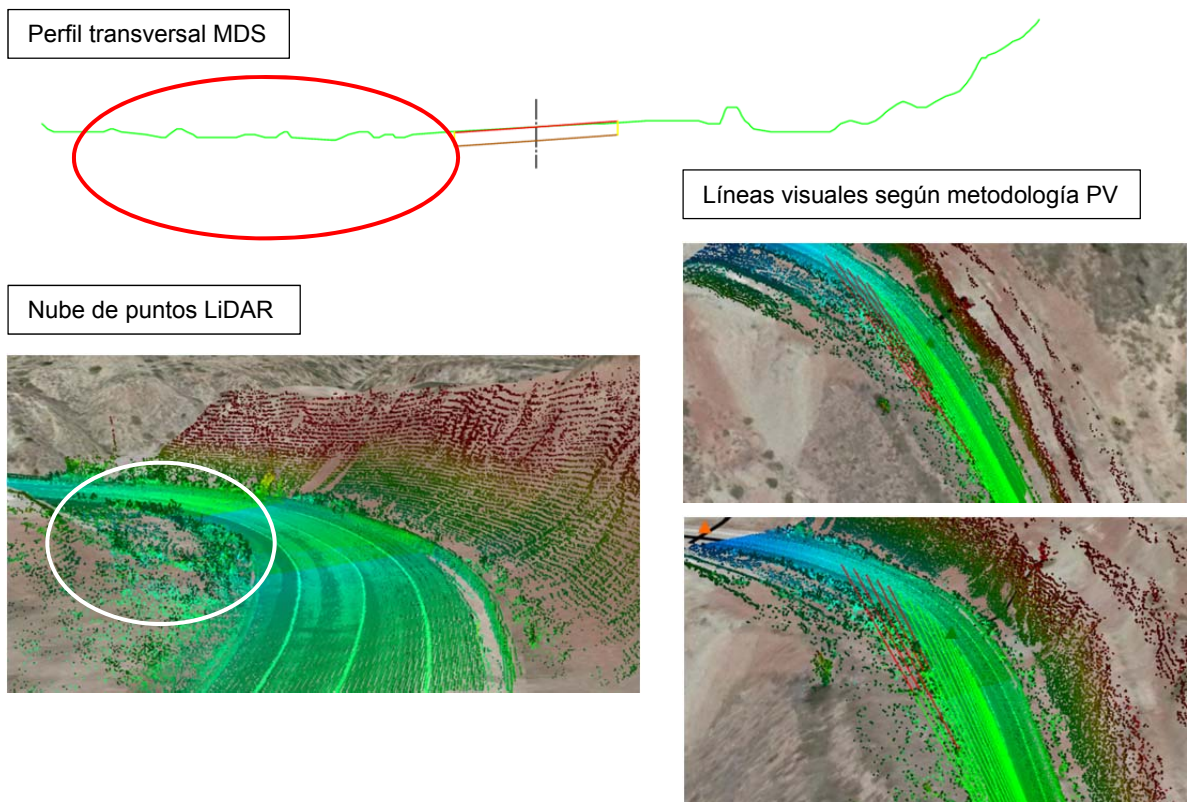


Figura 187: Vegetación baja representada en un perfil transversal obtenido del MDS (imagen superior) y vista de la nube de puntos LiDAR en ese mismo tramo y de las visuales obtenidas por PV (imágenes inferiores)

Los siguientes factores condicionan el resultado de visibilidad obtenido a partir del MDS:

- El proceso de generación del modelo, con un paso de malla de 0,1 m, asigna la mayor cota de los puntos pertenecientes a la celda a su centro, generando valores piramidales y un granulado característico (Figura 188). El tamaño de celda seleccionado impone diferentes morfologías de perfil transversal y por tanto, diferentes resultados de visión (Figura 189). En el apartado 4.3.2 se describen los motivos que justifican la selección de este paso de malla en la presente investigación.
- La equidistancia de curvas de nivel del curvado establecida en 0,10 m constituye el límite máximo de error atribuible a este parámetro. Por ejemplo, una altura de obstáculo de 0,09 m no da lugar a la generación de la primera curva de nivel correspondiente a 0,10 m.
- La distancia fija entre perfiles transversales consecutivos, establecida en 1,0 m modifica la posición relativa del perfil en cada celda y por tanto también la morfología de perfiles resultantes (Figura 190).

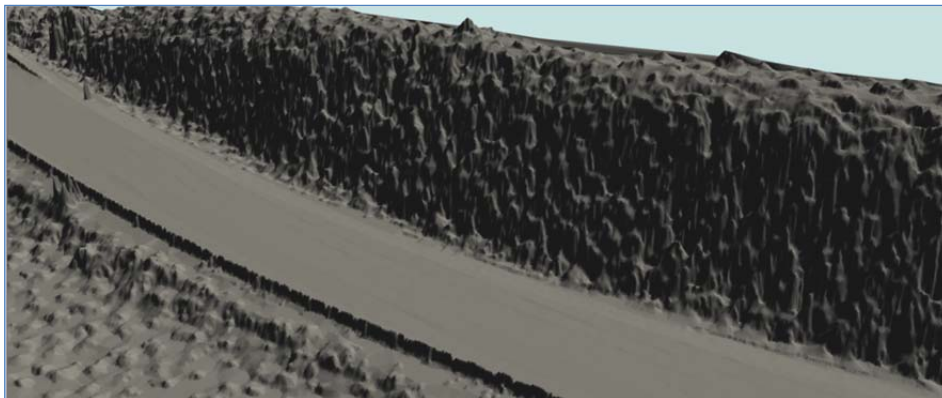


Figura 188: Granulado característico del MDS propio del modelo basado en rasterización previa

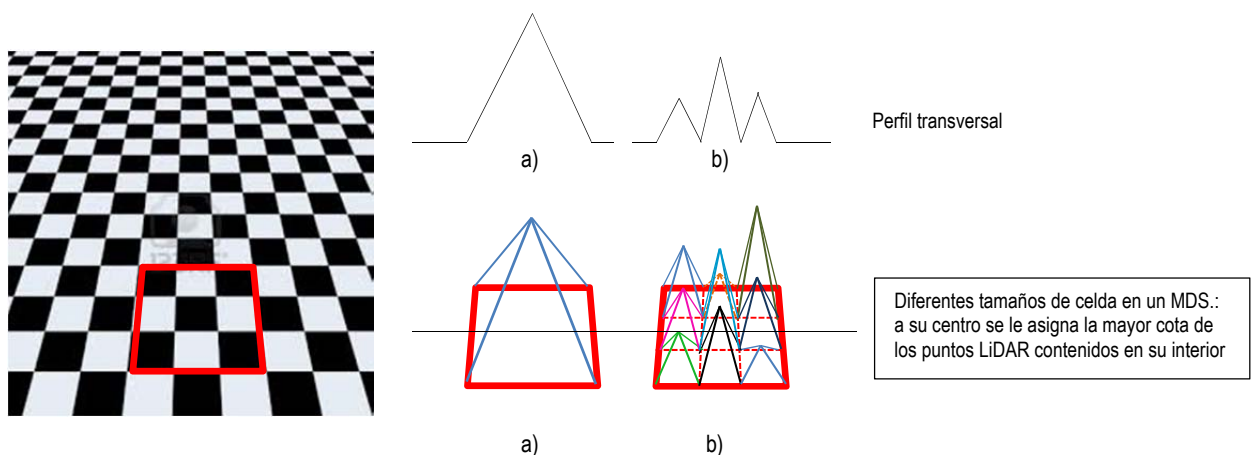


Figura 189: Efecto del tamaño de la celda raster en la morfología del perfil transversal resultante. Tamaño mayor (a), tamaño menor (b)

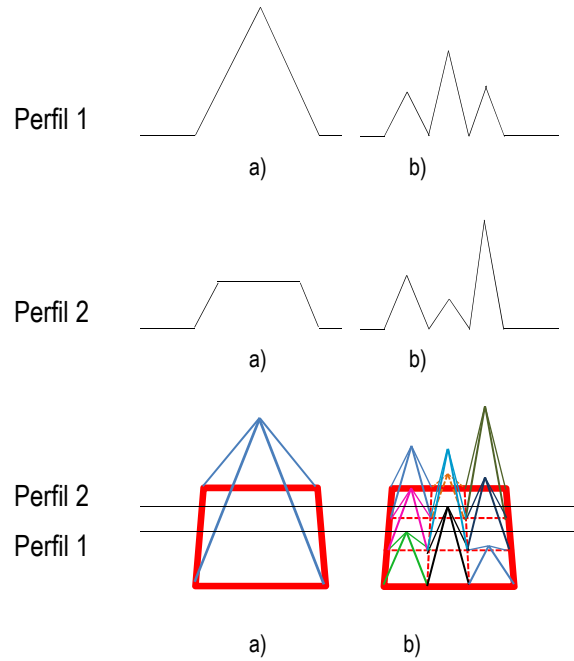


Figura 190: Efecto de la posición del plano de sección vertical y del tamaño de celda en la morfología del perfil transversal resultante

Teniendo en cuenta estas limitaciones, atribuibles a la modelización MDS, es necesario analizar hasta qué punto las metodologías MDS y PV descritas arrojan valores similares de visibilidad. Se trata de determinar si un MDS suficientemente preciso, empleado de forma convencional en software de diseño, aproxima sus resultados a la nueva metodología propuesta.

Del análisis de los resultados obtenidos se observa que, a pesar de que en una parte importante del tramo de carretera analizado esto es así (Figura 191), también existen estaciones en las que la visibilidad disponible por PV es superior a la obtenida a partir del MDS (Figura 192), por lo que, a pesar de una mejor definición de obstáculos obtenida a partir de la nube de puntos LiDAR y la ausencia de las simplificaciones propias de la generación del modelo digital de superficies y de los perfiles transversales, las distancias de visibilidad disponible según PV no resultan siempre iguales o inferiores a las obtenidas por MDS.

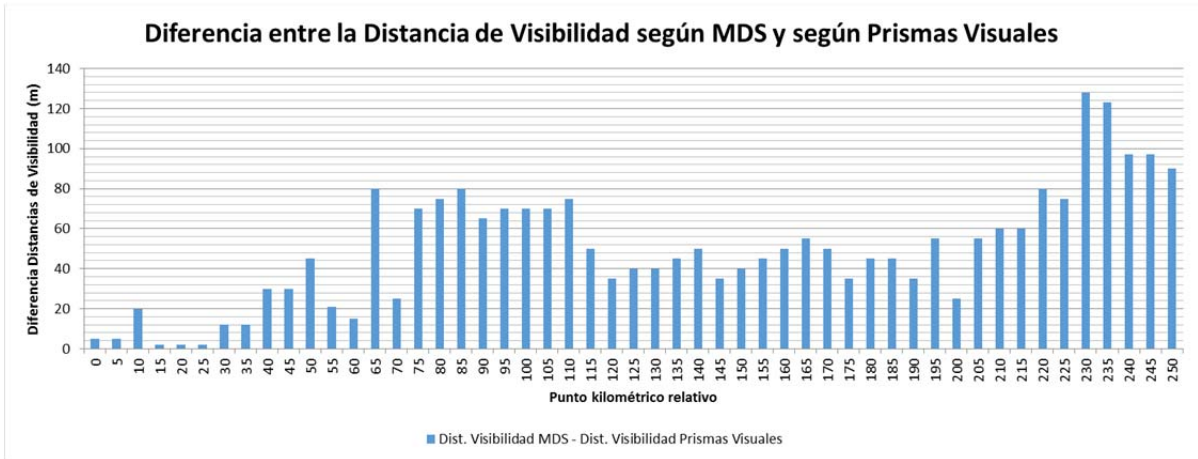


Figura 191: Tramo de la CV-35 en el que la visibilidad disponible por MDS es superior a la obtenida por Prismas Visuales

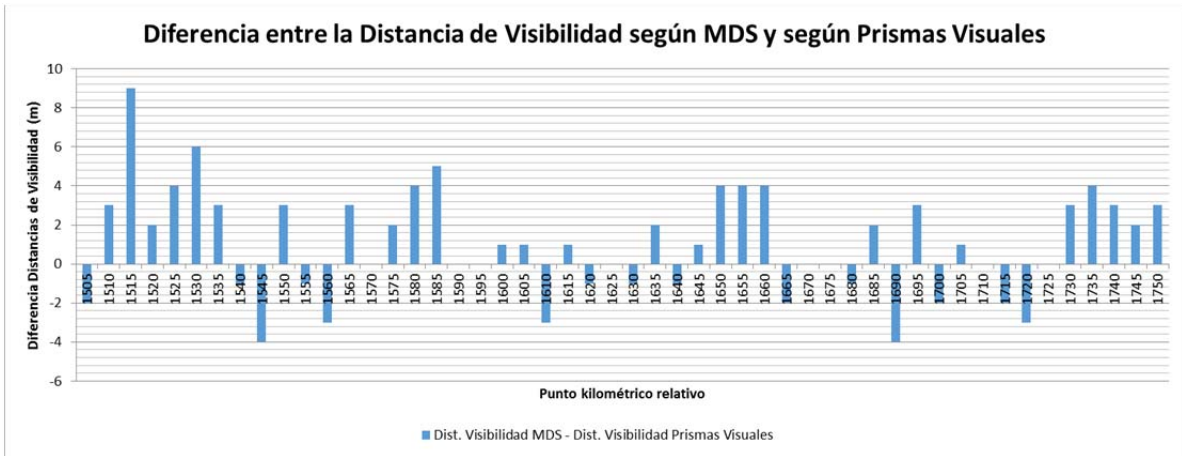


Figura 192: Tramo de la CV-35 en el que existen estaciones donde la visibilidad disponible por Prismas Visuales es superior a la obtenida por MDS

Esta circunstancia, que ocurre en un 9,51% de los casos (Figura 193), fue detectada también en un porcentaje prácticamente idéntico al comparar las metodologías basadas en MDT y MDS, donde también se mostraba una cierta proporción de puntos de observación con visibilidad por MDS mayor que por MDT (9,52%), sin embargo, en la comparativa MDS-PV deben tenerse en cuenta importantes particularidades:

- Cuando la visibilidad por PV resulta superior a la visibilidad por MDS, lo hace en la mayoría de los casos en valores que no superan los 5 m de diferencia (93,55% del total en que se produce esta circunstancia), siendo éste el error máximo achacable al procedimiento seguido para medir la visibilidad según PV.
- La mayor diferencia de distancia de visibilidad detectada en este caso para las 651 estaciones analizadas, es de 15 m. Este valor es sensiblemente menor que el detectado en la comparativa MDT-MDS, donde el valor

máximo de la diferencia de visibilidad, cuando ésta es superior por MDS que por MDT, era de 140 m.

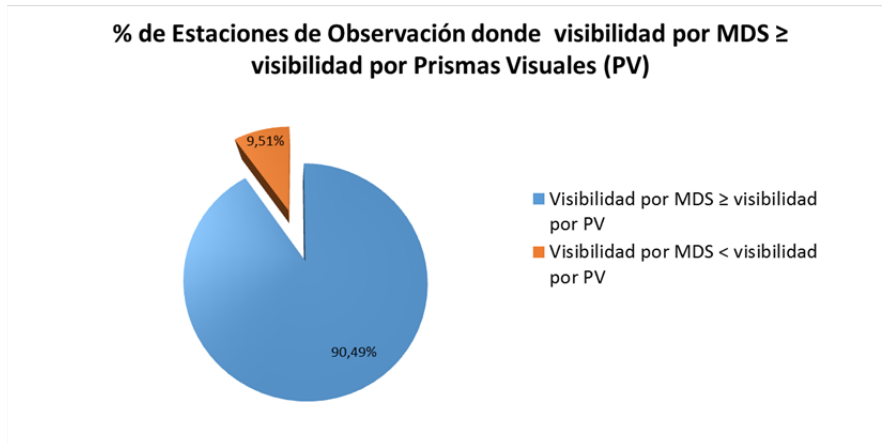


Figura 193: Porcentaje sobre el total de puntos de observación en los que la visibilidad disponible según MDS es mayor o igual que por PV (carretera CV-35)

En relación con la metodología basada en MDT, el MDS disminuye las diferencias con respecto a los resultados obtenidos con PV (Figura 194), no obstante, su magnitud sigue siendo en muchos casos muy elevada. Así por ejemplo en un 19,20% del total de puntos de observación, presenta diferencias entre ambos resultados superiores a los 50 m (Figura 195).

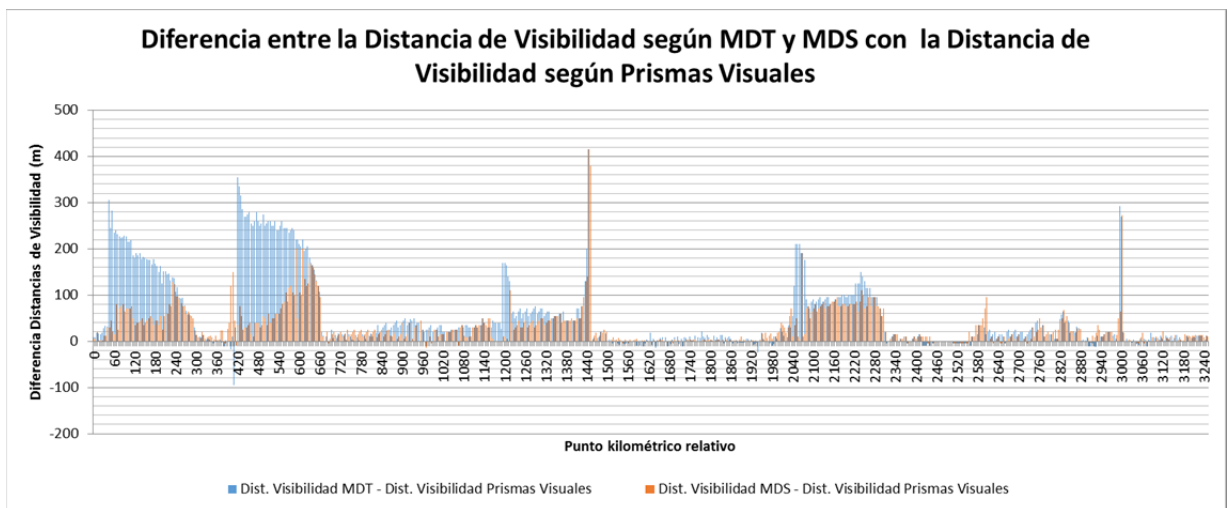


Figura 194: Representación conjunta de la diferencia entre los resultados de visibilidad por MDT y MDS en relación a los obtenidos por PV (carretera CV-35)

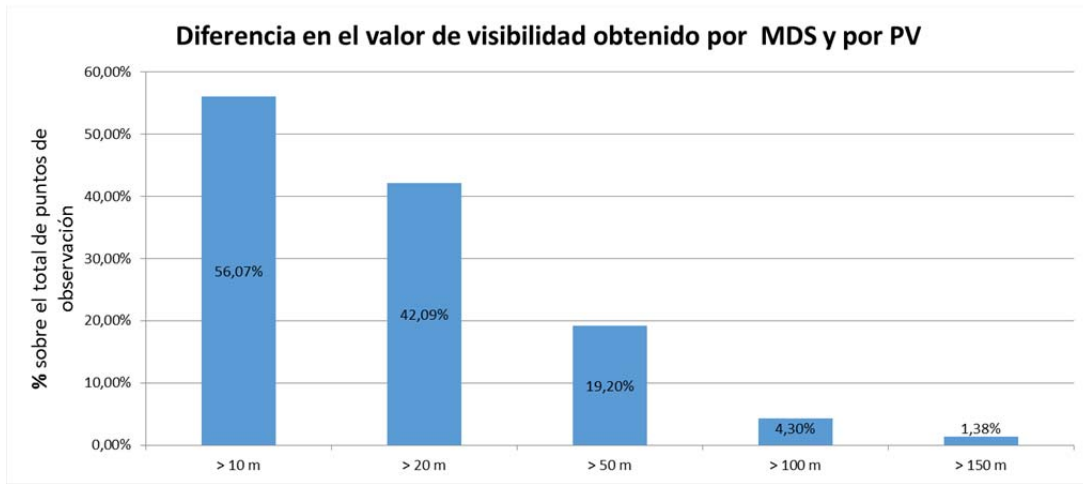


Figura 195: Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad obtenido a partir de MDS y a partir de PV supera un determinado valor (Carretera CV-35)

El empleo de un MDS aumenta la aproximación de resultados de visibilidad a los obtenidos por PV con respecto a lo que ocurría cuando se empleaba un MDT (Figura 196), especialmente en aquellos puntos de observación donde las diferencias eran mayores (mayor que 100 m y mayor que 150 m); sin embargo, siguen existiendo notables diferencias que se pueden traducir en importantes sobreestimaciones de la visibilidad realmente disponible.

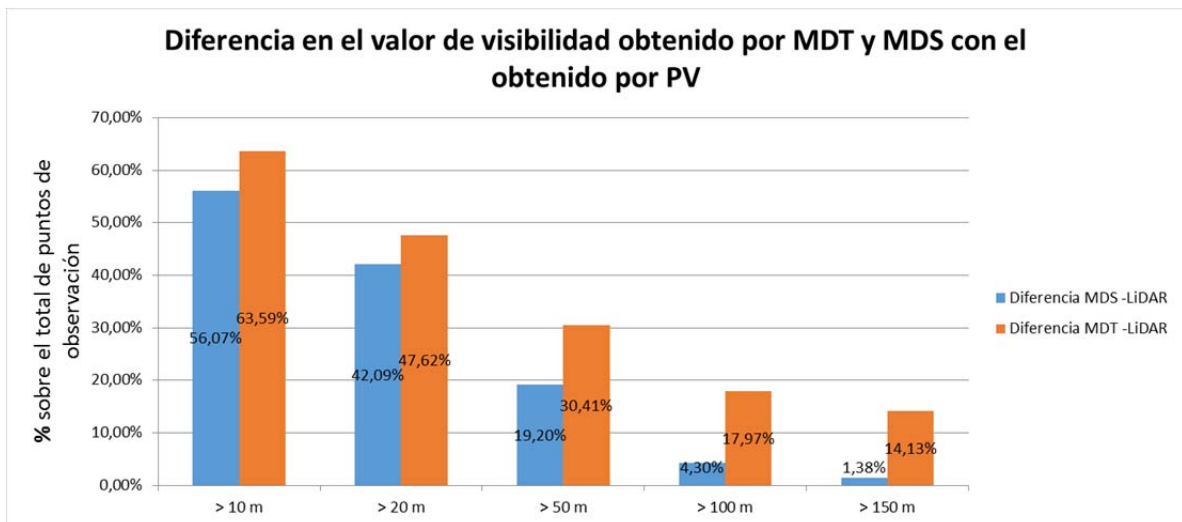


Figura 196: Representación conjunta del porcentaje de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad obtenido a partir de MDT y MDS con respecto al obtenido por PV supera un determinado valor (carretera CV-35)

En términos globales, el error cuadrático medio (ECM) es en este caso, igual a 2387,56 m², siendo $\sqrt{ECM} = 50,72 \text{ m}$.

En el gráfico de frecuencias acumuladas (Figura 197) se observan todavía importantes diferencias entre los resultados de ambos modelos con diferencias que llegan a casi los 280 m en la visibilidad de parada obtenida. Esta circunstancia hace que a pesar de una reducción en el valor del ECM con respecto a las comparativas MDT-MDS y MDT-PV, éste siga tomando un valor sensiblemente elevado.

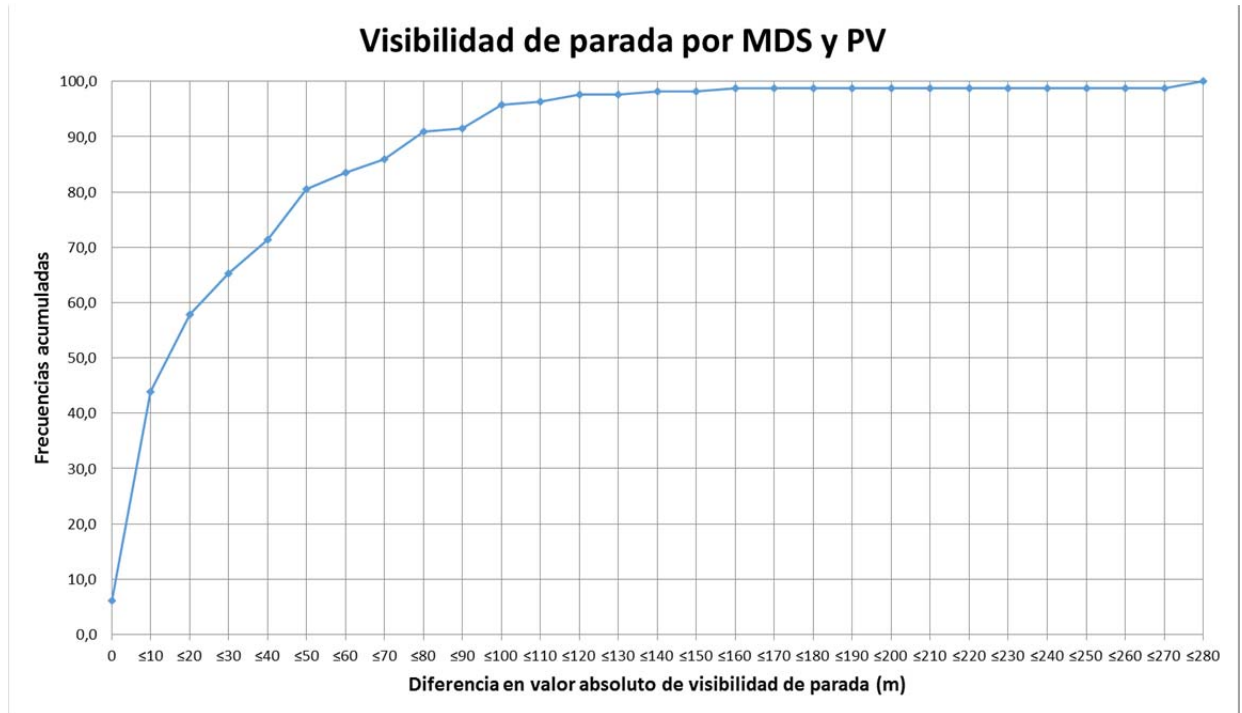


Figura 197: Gráfico de frecuencias acumuladas para diferencias de visibilidad obtenidas por MDS y PV (Carretera CV-35)

4.6.3 Estudio comparativo de las visibilidades obtenidas mediante prismas visuales (PV) y perfiles teóricos de proyecto.

Un análisis de interés para la práctica ingenieril es determinar si los estudios de visibilidad que se llevan a cabo durante la fase de diseño a partir de software específico y perfiles de proyecto, se corresponde con la visibilidad realmente disponible en la fase de explotación de la carretera.

Este no es, sin embargo, un estudio sencillo, ya que para llevarlo a cabo sería necesario disponer de los perfiles de proyecto que realmente hayan sido ejecutados. A pesar de que este no ha sido el caso de la muestra disponible en esta investigación, debido al interés de este análisis y dado que se cuenta con información precisa de la realidad

ejecutada gracias a los datos LiDAR mobile, esos perfiles han sido estimados, dotándolos del máximo detalle que permite el software comercial empleado. De esta forma se llega al mismo nivel de definición que habría alcanzado un proyectista en la fase de diseño, en este caso con el empleo del software CLIP (versión-1.27.54.265.0g-0a-d0) que es el utilizado a lo largo de toda la investigación.

En este apartado se comparan los resultados obtenidos a partir de estos perfiles con los resultantes de la aplicación de la nueva metodología de prismas visuales de modo que se someta a contraste la hipótesis de que, en fase de proyecto, puede sobreestimarse la visibilidad realmente disponible en la fase de explotación. Los resultados de visibilidad obtenidos a partir de los perfiles teóricos de proyecto y de la metodología de prismas visuales (PV) presentados de forma gráfica, muestran que estos últimos presentan valores menores que los primeros en la mayoría de los puntos de observación, siendo más evidentes las diferencias en unos tramos que en otros (Figura 198).

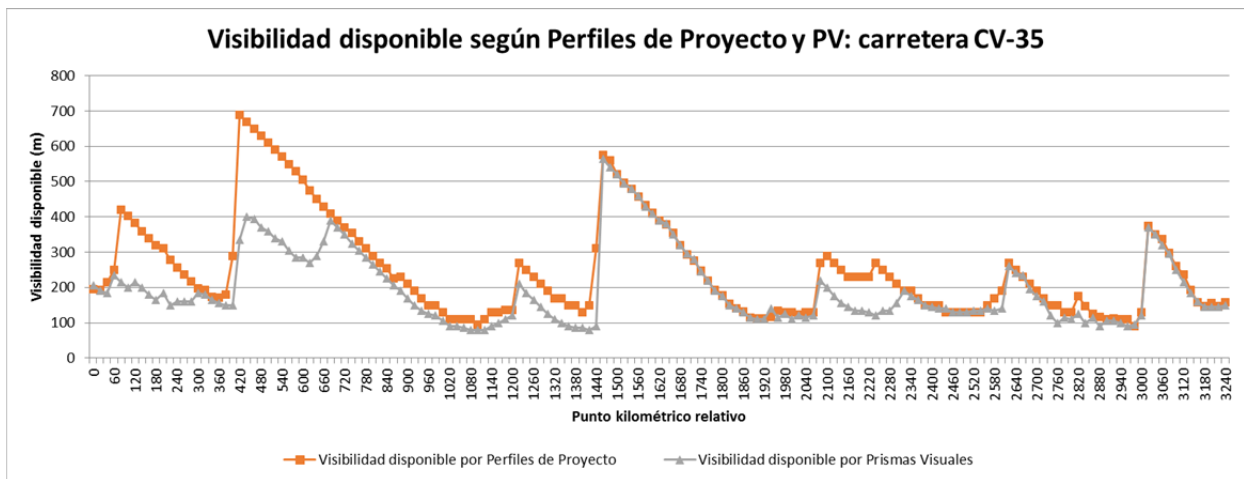


Figura 198: Visibilidades disponibles obtenidas mediante perfiles teóricos de proyecto y PV (carretera CV-35)

En el Anexo 8 se incluyen los gráficos que representan la diferencia de visibilidad obtenida por aplicación de ambos modelos. Dichas diferencias muestran valores de magnitud variable desde 0 hasta 355 m (Figura 199), lo que supone valores elevados pero inferiores a los obtenidos cuando se comparaba los resultados de PV con MDT. Esto puede ser atribuible a la mejora en la definición de obstáculos que puede suponer introducir en los perfiles las barreras o los muros, aunque sea como líneas rectas verticales bidimensionales.

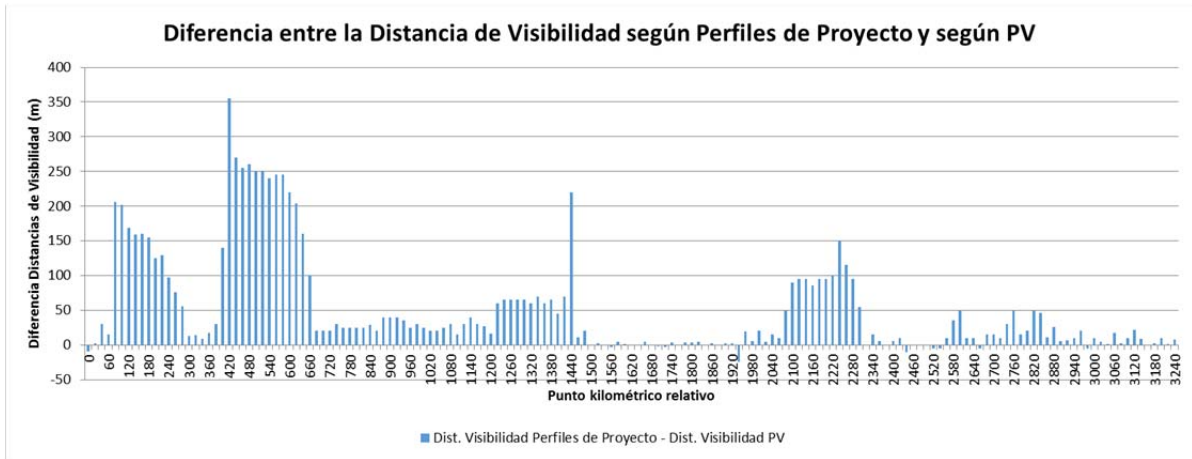


Figura 199: Diferencia entre las distancias de visibilidad obtenidas por perfiles teóricos de proyecto y por PV (carretera CV35)

Al igual que ocurre en otras comparativas, los valores de visibilidad disponible son mayoritariamente superiores para los resultados de perfiles teóricos de proyecto (Figuras 198, 199 y 200); sin embargo, existe un número de casos en los que los valores de visibilidad por perfiles de proyecto son inferiores a los obtenidos por la metodología de prismas visuales (Figura 201).

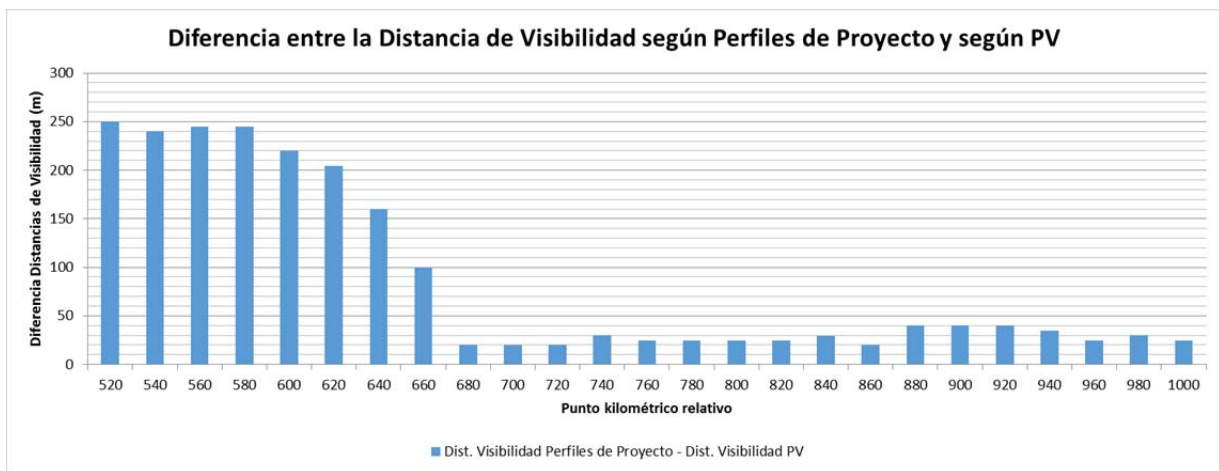


Figura 200: Tramo de la CV-35 analizada en el que la visibilidad disponible por perfiles teóricos de proyecto es superior a la obtenida por PV (carretera CV-35)

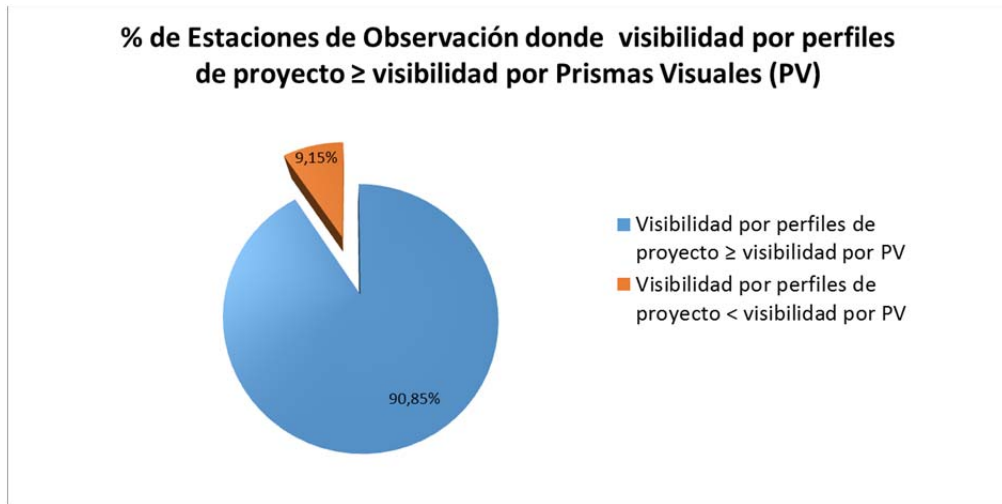


Figura 201: Porcentaje sobre el total de puntos de observación en los que la visibilidad disponible por perfiles teóricos de proyecto es mayor o igual que por PV (carretera CV-35)

En la Figura 202 puede observarse un tramo de la carretera analizada donde varias estaciones muestran una visibilidad por perfiles de proyecto superior a la obtenida por PV (valores negativos). En la práctica totalidad de los casos en los que se da esta circunstancia (9,15% del total), las diferencias son inferiores a los 5 m, debiendo además recordarse que el fraccionamiento de la carretera llevado a cabo para medir visibilidades por PV, es de 5,0 m. Este es el error máximo que puede ser introducido en los resultados como consecuencia exclusivamente de la forma adoptada para realizar la medición según esta metodología.

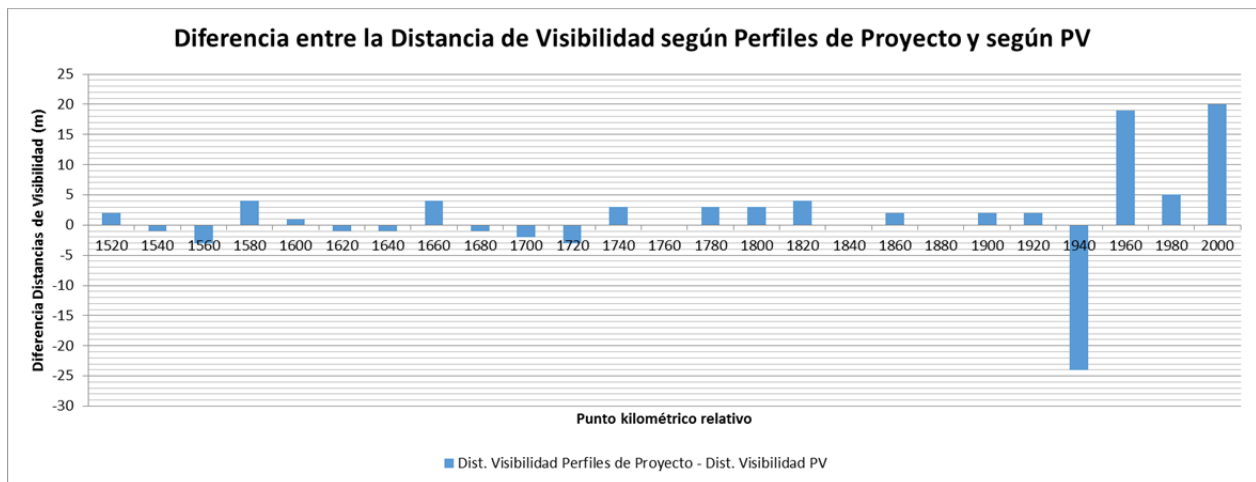


Figura 202: Tramo de la CV-35 en el que existen estaciones donde la visibilidad disponible por Prismas Visuales es superior a la obtenida por perfiles de proyecto

Los resultados obtenidos muestran de nuevo que el mayor número y detalle con que son representados los obstáculos que impiden la visión en la metodología de PV, el tiempo transcurrido desde la ejecución de la carretera, que puede provocar por ejemplo, el crecimiento o la aparición de vegetación en su entorno, así como el hecho de que otros obstáculos presentes, tales como la vegetación no sean incorporados a los perfiles teóricos de proyecto, hacen que las estimaciones de visibilidad realizadas en esta fase se encuentren sobreestimadas en la mayoría del trazado.

La magnitud de las diferencias obtenidas puede observarse en la Figura 203, donde un 63,80% de las estaciones de observación difieren en más de 10 m entre las dos metodologías, un 14,72% lo hace en más de 100 m y un 11,66% en más de 150 m.

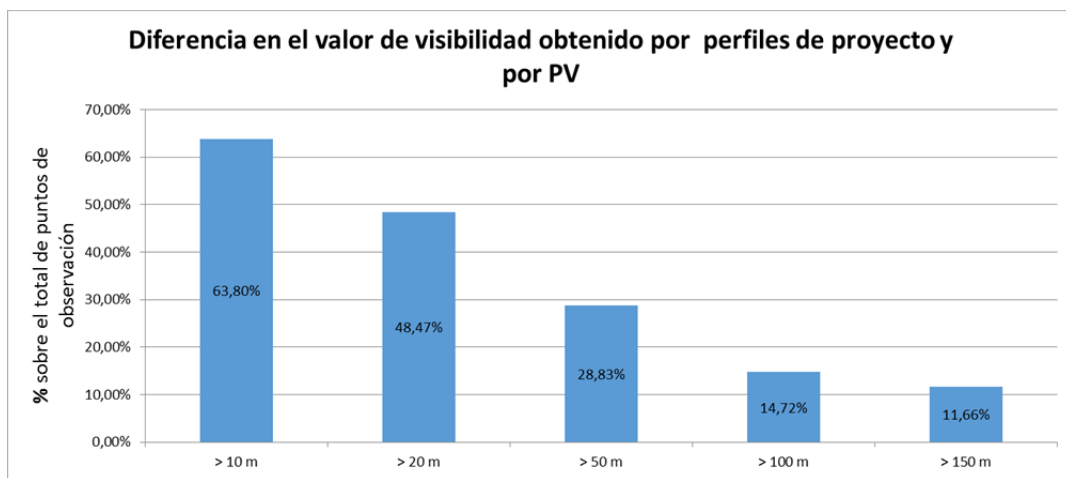


Figura 203: Porcentaje sobre el total de estaciones de observación en las que la diferencia entre el valor de visibilidad obtenido a partir de Perfiles de Proyecto y a partir de PV supera un determinado valor (carretera CV-35)

De los datos anteriores se deduce que, para el tramo de carretera analizado, los perfiles teóricos de proyecto, además de suponer una sobrestimación generalizada de las visibilidades realmente disponibles, lo hacen en magnitudes elevadas en porcentajes no despreciables del total de puntos de observación.

En términos globales, el error cuadrático medio (ECM) es en este caso, igual a 7748,91 m², siendo $\sqrt{ECM} = 88,03 \text{ m}$.

El grafico de frecuencias acumuladas expresado en la Figura 204 permite interpretar el valor del ECM. De nuevo las diferencias en una proporción importante de puntos de observación son elevadas. En este caso el ECM, aun siendo un valor muy alto, resulta menor que en la comparativa MDT-PV pero no mejora los resultados de ECM de la comparativa entre MDS y PV.

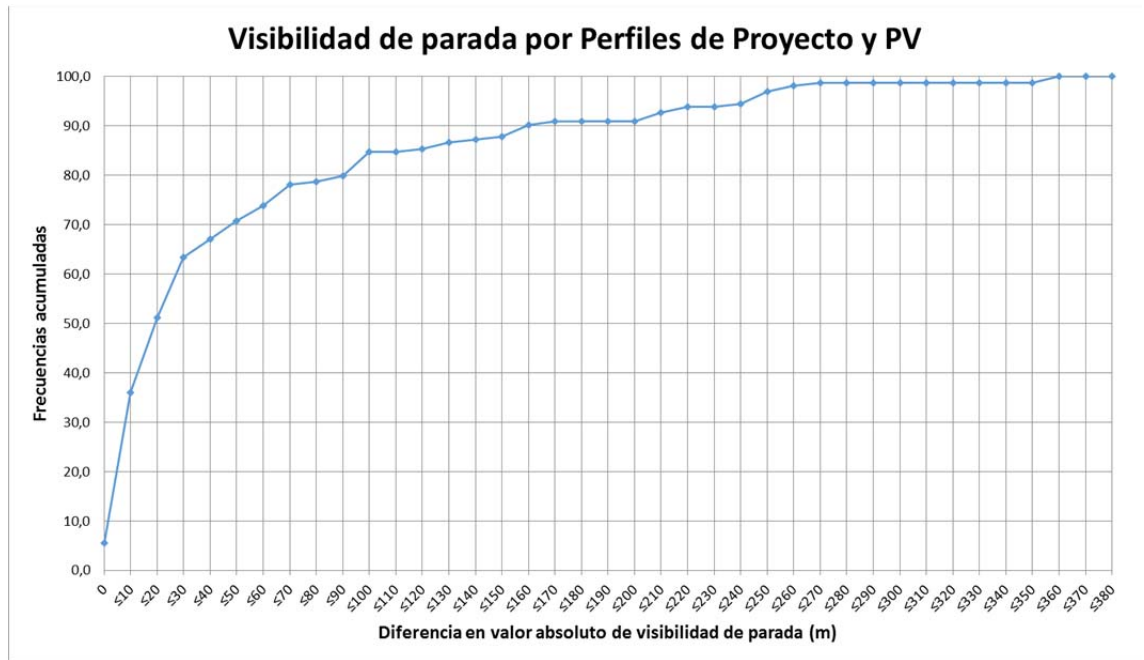


Figura 204: Gráfico de frecuencias acumuladas para diferencias de visibilidad obtenidas por Perfiles de Proyecto y PV (Carretera CV-35)

4.6.4 Influencia en el tiempo de percepción y reacción de la anchura del prisma visual en una curva circular

La consideración de un prisma visual de cierta anchura entre el observador y el objetivo en lugar de la tradicional línea recta visual trazada entre ellos, supone que no existe visión de dicho objetivo, hasta que el prisma visual no pueda ser trazado entre ambos sin interrupción en toda su anchura.

Una de las hipótesis inicialmente planteadas en esta investigación supone que, a las velocidades de circulación propias de una carretera, en el interior de una curva circular, la diferencia de tiempo entre la consideración de una línea recta visual y un prisma visual de cierta anchura, no es significativo en relación con el tiempo de percepción y reacción considerado en las actuales guías de diseño geométrico.

Para comprobar esta hipótesis, se ha analizado un caso teórico simplificado en el que un vehículo discurre por un tramo circular de radio R , en el interior del cual se encuentra un obstáculo P .

Suponiendo que no existe limitación en el giro de la cabeza que puede practicar el conductor para ver hacia adelante y hacia el interior de la curva, la distancia de visibilidad disponible, medida a lo largo del desarrollo circular, resultaría variable en función de la posición del observador considerada O_i entre un valor máximo igual a la mitad del desarrollo circular (πR) en la posición O_o y un valor mínimo igual al arco de círculo que define la cuerda $\overline{O_F Q_F}$ de flecha F en la posición O_F (Figura 205).

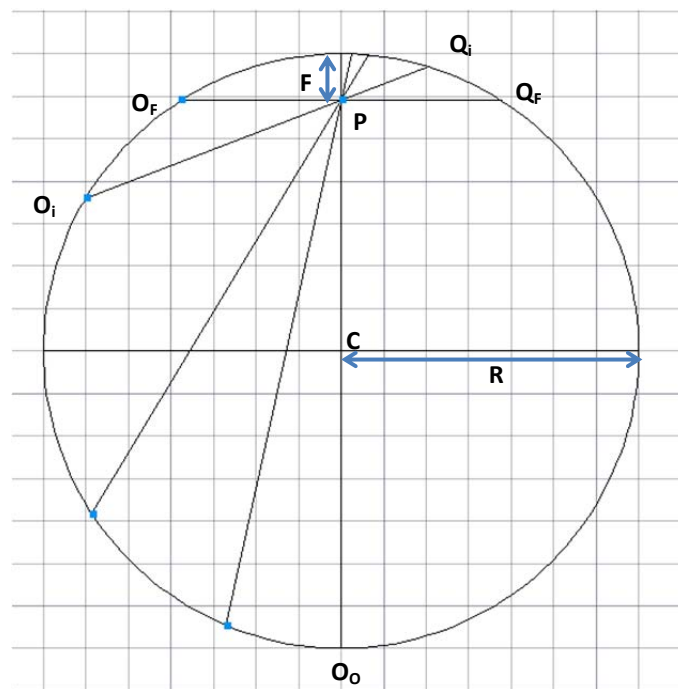


Figura 205: Distancias de visibilidad disponibles variables en un tramo circular en presencia de un obstáculo P interior a la curva

Considerando esta situación de visibilidad disponible mínima como más crítica en la conducción, en la que el observador se encuentra situado en la posición O_F , la existencia de una cierta anchura de prisma visual de anchura total a , supone una nueva posición del observador O'_F que determina la condición límite de existencia de visión. Esta nueva posición afecta a la longitud resultante de la cuerda y, por tanto, al arco que determina la distancia de visibilidad disponible (Figura 206).

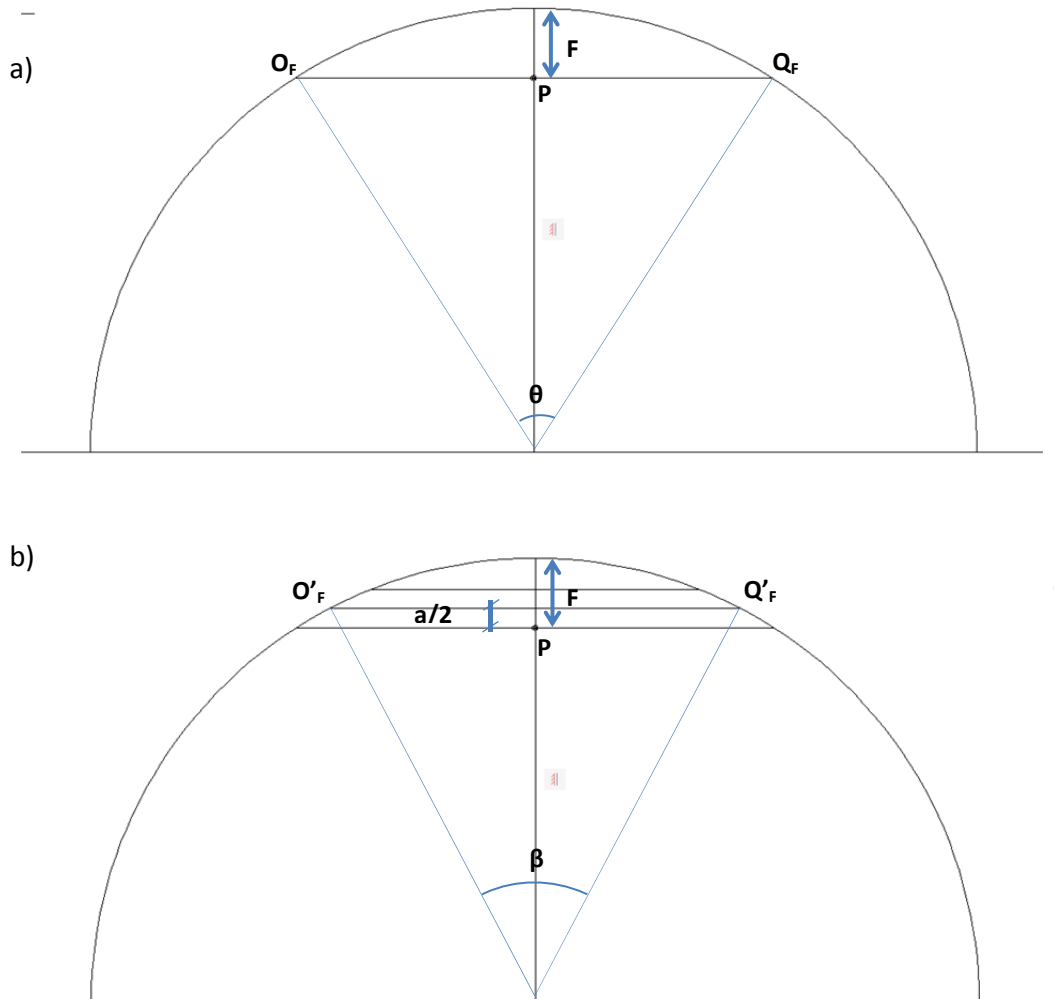


Figura 206: Distancia de visibilidad disponible para los casos de línea visual recta (a) y prisma visual (b) en presencia de un obstáculo P interior a la curva

Bajo estas condiciones se verifica la Ecuación 61 (Figura 206 a):

$$R - F = R \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (61)$$

Donde:

R = radio de la curva circular.

θ = ángulo que forman las líneas que unen los extremos de la cuerda O_F y Q_F con el centro del desarrollo circular.

F = distancia del obstáculo a la curva circular.

El ángulo θ puede entonces obtenerse a partir de la Ecuación 62:

$$\theta = 2 \cdot \arccos\left(\frac{R-F}{R}\right) \quad (62)$$

Siendo por tanto el desarrollo circular D_1 el resultante de aplicar la Ecuación 63:

$$D_1 = R \cdot \theta \quad (63)$$

Donde:

D_1 = distancia de visibilidad disponible mínima bajo la consideración de línea recta visual tangente al obstáculo equivalente al desarrollo de círculo entre O_F y Q_F .

La consideración de la anchura de prisma visual genera un retranqueo del despeje equivalente a la mitad de dicha anchura, lo que provoca una disminución de la cuerda y del arco circular correspondiente (Figura 206 b).

La nueva cuerda resulta de la Ecuación 64:

$$R - F + a/2 = R \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (64)$$

donde

R = radio de la curva circular.

β = ángulo que forman las líneas que unen los extremos de la cuerda O'_F y Q'_F con el centro del desarrollo circular.

F = distancia del obstáculo a la curva circular.

a = anchura del prisma visual.

El ángulo β puede entonces obtenerse a partir de la Ecuación 65:

$$\beta = 2 \cdot \arccos\left(\frac{R-F+\frac{a}{2}}{R}\right) \quad (65)$$

Siendo por tanto el desarrollo circular D_2 el resultante de aplicar la Ecuación 66:

$$D_2 = R \cdot \beta \quad (66)$$

Donde:

D_2 = distancia de visibilidad disponible mínima bajo la consideración de prisma visual tangente al obstáculo equivalente al desarrollo de círculo entre O'_F y Q'_F .

Conocidas D_1 y D_2 , el desarrollo de círculo entre los observadores O_F y O'_F (Figura 207) resulta igual a la mitad de la diferencia de los desarrollos D_1 y D_2 (Ecuación 67):

$$S = \frac{D_1 - D_2}{2} \quad (67)$$

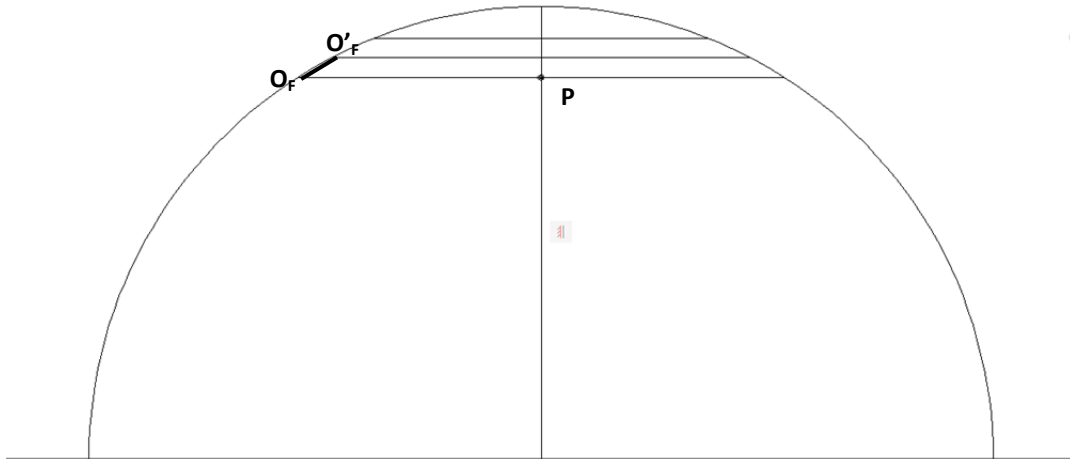


Figura 207: Posición de los observadores O_F y O'_F que determinan la distancia de visibilidad mínima en presencia de un obstáculo P interior a la curva, correspondientes a línea recta visual y prisma visual respectivamente

Dado que las circunstancias de radio, despeje y velocidad son variables en carreteras en servicio, en la Tabla 24 se resumen varios valores de tiempo t resultante para variar entre las posiciones O_F y O'_F para valores de despeje de 2, 3 y 4 m, con radios correspondientes a velocidades específicas de 40 km/h, 60 km/h y 80 km/h y velocidades equivalentes a la específica (M. Fomento, 2000) ± 10 km/h. La anchura de PV considerada es de 0,50 m.

Este rango de valores permite obtener un orden de magnitud de los tiempos resultantes.

Tabla 24: Tiempo invertido para variar la posición del observador considerando el efecto de la anchura de PV de 0,50 m en el despeje para diferentes radios y velocidades

Radio (m)	F (m)	V(km/h)	t (s)
50	2	30	0,111
	2	40	0,083
	2	50	0,066
	3	30	0,090
	3	40	0,067
	3	50	0,054
	4	30	0,078
	4	40	0,058
	4	50	0,047
130	2	50	0,106
	2	60	0,089
	2	70	0,076
	3	50	0,086
	3	60	0,072
	3	70	0,061
	4	50	0,074
	4	60	0,062
	4	70	0,053
265	2	70	0,108
	2	80	0,095
	2	90	0,084
	3	70	0,088
	3	80	0,077
	3	90	0,068
	4	70	0,075
	4	80	0,066
	4	90	0,059

Los resultados muestran que el tiempo transcurrido entre las dos posiciones del observador es muy reducido, suponiendo proporciones despreciables frente a los tiempos habitualmente considerados como de percepción y reacción por las diferentes guías de diseño. Así, para la situación más desfavorable de las consideradas, con despeje de 2,0 m, radio de 50 m y velocidad de 30 km/h el tiempo resultante entre la consideración de una línea recta visual y un prisma visual de 0,50 m de anchura, es de 0,111 s, lo que supone tan solo un 5,5% del tiempo total de percepción y reacción (2 s) establecido por la guía de diseño española (Fomento, 2000).

5 Aportaciones de la Investigación

Durante la presente investigación se han obtenido una serie de procedimientos y resultados que pueden suponer una nueva herramienta de evaluación sistemática de la visibilidad realmente disponible en carreteras existentes a partir de técnicas de teledetección basadas en LiDAR.

Es objeto de este Capítulo resumir las aportaciones que la tesis supone a la práctica ingenieril y a futuras investigaciones en el ámbito de la evaluación de carreteras existentes, especialmente desde el punto de vista de la seguridad vial y del diseño geométrico.

5.1 APLICACIONES PRÁCTICAS

El estado del arte es el punto de partida no solo de esta investigación, sino de todas aquellas que se inicien a partir de ella, constituyendo en sí mismo una aportación al conocimiento de gran interés para investigadores y profesionales. El recorrido a través de los conceptos de visibilidad empleados en ingeniería de carreteras y sus procedimientos de cálculo, por un lado, y de los fundamentos de la tecnología LiDAR y su aplicación a la estimación de visibilidades por otro, permite desarrollar nuevas aplicaciones y procesos de los que la metodología propuesta en esta tesis aspira a ser solo el inicio.

Los sistemas LiDAR, combinados con sistemas de posicionamiento por satélite y sistemas de medición inercial permiten obtener un gran volumen de información del entorno inmediato de la carretera cuyas posibilidades no deben ser pasadas por alto. Hoy en día, tras su necesaria fase de maduración y desarrollo, esta tecnología se encuentra ya disponible para su uso extensivo en carreteras en servicio con precisiones y densidades crecientes y con costes de adquisición cada día menores. Los sistemas LiDAR mobile montados sobre vehículos automóviles hacen de las carreteras existentes la ubicación idónea para el registro de este tipo de datos.

Se dispone por tanto ya, de la posibilidad real de contar con un elevadísimo número de puntos georreferenciados pertenecientes a los objetos próximos a la carretera, que en su conjunto, suponen un fiel reflejo de todo aquello que puede constituir un obstáculo potencial a la visión.

Esta investigación pone en valor la información bruta procedente de estas nubes de puntos mediante una propuesta metodológica desarrollada en forma de algoritmos de aplicación sistemática orientados al análisis de la red viaria en servicio.

De acuerdo con ello, se ha propuesto una forma de evaluar la existencia o no de visión mediante el empleo de visuales trazadas directamente contra la nube de puntos LiDAR. Para ello se han definido por primera vez los conceptos de Prisma Visual (PV) y de Unidad Prismática Rectangular (UPR) como elementos básicos constitutivos de esta nueva forma de concebir la visión.

En la búsqueda de aplicaciones prácticas de uso inmediato, los algoritmos desarrollados durante la investigación se implementan en programas de diversa índole, especialmente aplicaciones GIS y visualizadores tridimensionales de código libre, con parámetros tales como altura o posición sobre la calzada, tanto del observador como de los puntos objetivo seleccionables en cada caso. La inclusión de estos valores como parámetros permite asimismo flexibilizar las posibilidades de uso con diferentes normativas, criterios y tipos de maniobra analizados ampliando el ámbito de uso del sistema.

Gracias a estos desarrollos, los resultados pueden ser visualizados junto con la nube de puntos LiDAR desde cualquier perspectiva como un “ray-tracing” o radiado de visuales desde un observador dado hacia uno o múltiples objetivos. De este modo, el ingeniero de carreteras cuenta con la posibilidad de evaluar la visibilidad disponible directamente en tres dimensiones, interpretando y analizando a la vez los motivos de la obstrucción a la visión. Esta forma de proceder constituye un avance hacia la eliminación de la necesidad de acudir a costosas, tediosas y a menudo peligrosas mediciones de campo.

Para un tramo de carretera existente, el análisis de los resultados de distancia de visibilidad de parada obtenidos por la nueva metodología de PV en comparación con las tradicionales metodologías que aplican software de diseño comercial a modelos digitales del terreno (MDT) y modelos digitales de superficies (MDS), han permitido además demostrar la elevada variabilidad existente entre ellos, así como la sobreestimación de la visibilidad disponible que suponen estos modelos sobre la nueva metodología. En un 83,77% de las estaciones de observación correspondientes al caso analizado, la visibilidad más restrictiva ha correspondido a la nueva metodología de PV.

Por otro lado, cuando la metodología de PV arroja el menor valor de visibilidad disponible de entre las metodologías sometidas a estudio comparativo, la diferencia de visión que provoca con respecto al empleo de MDT y MDS toma valores importantes en un porcentaje no despreciable de estaciones de observación. En un 24,5% de los casos, la diferencia de visibilidad disponible entre la metodología de PV y la mínima de las visibilidades obtenidas por MDT y MDS, es superior a los 50 m, superando los 100 m en un 5,4% de los casos. La sobreestimación de visibilidad pone por tanto de manifiesto, la debilidad de las estimaciones de visibilidad disponible en carreteras en servicio que puedan realizarse en la práctica ingenieril atendiendo exclusivamente a MDT o incluso a MDS.

De la misma manera, cuando en el tramo analizado se comparan las visibilidades disponibles según la nueva metodología, con las obtenidas a partir de perfiles transversales de proyecto y programas de diseño geométrico actuales, los resultados son asimismo reveladores, ya que en el 90,85% de los puntos de observación la visibilidad disponible establecida en proyecto habría resultado sobreestimada, haciéndolo además en

magnitudes considerables (en un 28,83% de las estaciones la diferencia de visibilidad es superior a los 50 m, y en un 14,72% lo es a los 100 m).

Por otro lado, con el fin de relativizar estas diferencias y comparar los resultados de visibilidad disponible con la visibilidad de parada requerida para la realidad operacional de la vía, en el tramo analizado se ha procedido también a estimar la velocidad de operación de acuerdo con las investigaciones de Pérez et al. (2012). Los resultados evidencian que para la metodología hasta ahora más ampliamente utilizada en el ámbito profesional basada en MDT y software de diseño, se han obtenido un 25,54% menos de puntos de observación con visibilidad insuficiente que en la metodología de prismas visuales, reduciéndose esta diferencia a un 20% si se aplica un MDS.

En relación con lo anteriormente expuesto, es importante destacar que en el 74,65% de las estaciones de observación los resultados de visibilidad disponible han resultado inferiores cuando se emplea un MDS obtenido a partir de los datos procedentes de sistemas LiDAR mobile que cuando se emplea un MDT, lo que es atribuible a la mayor capacidad de reproducir otro tipo de obstáculos no presentes en el MDT pero que obstaculizan la visión. A pesar de ello, existe un cierto porcentaje de estaciones en las que esta visibilidad ha aumentado en lugar de disminuir (25,35%). Un análisis detallado de estas estaciones permite concluir que esta circunstancia se debe a la diferente precisión planimétrica y altimétrica de los datos de origen a partir de los cuáles se generan taludes y plataforma, cuya sensibilidad sería necesario precisar en futuras investigaciones. Los valores de visibilidad disponible obtenidos entre MDT y MDS suponen que en un 45,01% del total de estaciones de observación las diferencias son superiores a los 10 m, en un 12,44% lo hace en más de 100 m y en un 7,37% en más de 150 m.

Cuando el estudio comparativo se realiza entre los resultados obtenidos mediante la metodología de PV y mediante el uso de un MDT, las diferencias resultan evidentemente mayores. En un 87,10% de las estaciones analizadas la visibilidad disponible por PV ha resultado inferior a la visibilidad disponible por MDT. La magnitud de las diferencias obtenidas resulta asimismo reveladora ya que en un 17,97% son superiores a los 100 m y en un 14,13% lo es a los 150 m.

Estos valores y proporciones sugieren la inconveniencia de dejar el análisis de visibilidad en manos exclusivamente de los tradicionales MDT.

Por su parte, debido a que en el entorno más inmediato de la carretera tanto el MDS como la metodología de PV emplean como datos de origen los puntos procedentes del escaneado LiDAR mobile, y por tanto la precisión planimétrica y altimétrica de dichos puntos es la misma en ambos casos, un análisis especialmente importante llevado a cabo en esta investigación es la comparación de los resultados obtenidos por estas dos metodologías. En este caso, el 90,49% de las estaciones de observación analizadas presentan una visibilidad menor por PV que por MDS, de las cuales, el 19,20% supone una diferencia de visibilidad de más de 50 m. No obstante, este porcentaje se reduce

sensiblemente para diferencias superiores a 100 ó 150 m (4,30% y 1,38%, respectivamente).

De acuerdo con lo anterior, para el tramo de carretera analizado, el uso de un MDS procedente de LiDAR mobile en lugar de un MDT procedente de LiDAR aéreo, disminuye el porcentaje de estaciones en los que la visibilidad disponible es mucho mayor que la obtenida por PV, especialmente cuando las diferencias son altas (superiores a 100 y 150 m); sin embargo, supone todavía una sobreestimación de las visibilidades realmente disponibles en un porcentaje no despreciable de puntos del trazado.

Cuando se representan las diferencias de visibilidad obtenidas por cada una de la metodologías comparadas dos a dos, las gráficas de frecuencias acumuladas y los valores del Error Cuadrático Medio (ECM) demuestran que existen diferencias notables en porcentajes no despreciables de puntos de observación, incluso en el caso de que se empleen modelos digitales de superficies en software específico de diseño geométrico (Tabla 25).

Tabla 25: Tiempo invertido para variar la posición del observador considerando el efecto de la anchura de PV de 0,50 m en el despeje para diferentes radios y velocidades

	MDT-MDS	MDT-PV	MDS-PV	PERFILES-PV
<i>ECM</i>	4426,95 m ²	9024,59 m ²	2387,56 m ²	7748,91 m ²
\sqrt{ECM}	66,95 m	96,86 m	50,72 m	88,03 m

La presente investigación pone por tanto de manifiesto, el riesgo de asumir resultados de visibilidad propios de los modelos MDT procedentes de datos LiDAR aéreo e incluso de los MDS procedentes de datos LiDAR mobile en la evaluación de la seguridad de las maniobras en carreteras existentes y pone a su vez a disposición de los ingenieros de carreteras una nueva metodología con mayor definición del entorno próximo y de los posibles obstáculos a la visión de modo que puedan incorporarse auditorías de visibilidad como parte integrante de estudios y mejoras de la seguridad vial.

De igual forma, la investigación ha permitido atraer la atención sobre si el procedimiento de evaluación de visibilidades basado en perfiles teóricos de proyecto y software comercial, ampliamente extendido y aceptado en fase de diseño, es suficiente para garantizar la seguridad de las maniobras. Los resultados obtenidos muestran de nuevo que el mayor número y detalle con que son representados los obstáculos que impiden la visión en la metodología de PV, así como el hecho de que otros obstáculos presentes tales como la vegetación, no sean incorporados a los perfiles teóricos de proyecto, hacen que las estimaciones de visibilidad realizadas en esta fase se encuentren sobreestimadas en la mayoría del trazado.

Finalmente, dado que la metodología de PV contempla una cierta anchura de prisma que no era considerada hasta ahora en la tradicional consideración de línea recta visual trazada entre observador y obstáculo, en la investigación se ha analizado también el efecto, en términos de tiempo, que tiene esta anchura en la detección de un obstáculo situado en el interior de una curva circular, concluyéndose que, para los radios y velocidades propios del trazado de carreteras, la diferencia de tiempos es despreciable frente a los tiempos totales de percepción y reacción considerados habitualmente en las guías de diseño geométrico.

5.2 APLICACIONES METODOLÓGICAS

Dado que la nueva metodología se apoya en datos cuyas características pueden resultar diversas a tenor de los sistemas de captura empleados y de la velocidad de circulación del sistema, su influencia en relación con las dimensiones del PV y de la UPR, la metodología de captura de datos y los parámetros más apropiados forman parte también de las aportaciones de la investigación y se resumen seguidamente.

En este sentido, teniendo en cuenta que los tiempos de proceso necesarios para la obtención de visibilidades resultan ser aproximadamente proporcionales al número de puntos LiDAR localizados en cada prisma visual, ha resultado necesario estudiar la influencia de los datos de partida en los resultados para concluir en unas características de densidad mínimas que permitan los tiempos de proceso más reducidos con los mejores resultados de identificación del obstáculo.

Para casos comunes de limitación de la visibilidad en carreteras tales como talud de desmonte en el interior de una curva, vegetación en el interior de una curva o acuerdo vertical convexo, se ha analizado también el efecto que sobre los resultados obtenidos tienen en estos casos diferentes combinaciones de densidad de la nube de puntos LiDAR con diferentes parámetros que definen el prisma visual (PV) y la unidad prismática rectangular (UPR).

En el caso de taludes de desmonte se han registrado tasas de éxito en la identificación del obstáculo del 100% en densidades de puntos D1, D2 y D4 para todas las combinaciones de anchura de PV, altura de UPR, y del 99,84% en la muestra D3 con anchura de PV de 0,1 m y altura de UPR de 0,05 m. Sin embargo, esta tasa de éxito disminuye hasta el 82,5 % para anchuras de PV de 0,1 m, y hasta el 78% con alturas de UPR de 0,03 m cuando la densidad disminuye a una frecuencia de escaneo de 40 KHz con velocidades de circulación de hasta 70 km/h. Con esta frecuencia de escaneo se han obtenido tasas de éxito del 100% en dimensiones de 0,50 m de anchura de PV y 0,05 m de altura y profundidad de la UPR o superiores.

El caso de vegetación en el interior de una curva depende de la frondosidad y forma de dicha vegetación; sin embargo, las características de la nube de puntos LiDAR obtenida es sensiblemente diferente a la correspondiente a un paramento más o menos

uniforme como el que constituye un talud de excavación. La aleatoriedad en los puntos y la dispersión en el sentido longitudinal de la visual es en este caso mayor. Los resultados obtenidos corresponden a la muestra de mayor frecuencia de escaneo lo que ha permitido además el estudio con densidades variables. Las tasas de éxito son del 100% en las densidades D1, D2 y D3 y del 99,5% en las densidades D4 para cualquier dimensión de UPR. La densidad D4 ha arrojado asimismo tasas de éxito del 100% en anchuras de PV de 0,2 m o superiores para todas las densidades de puntos de entre las consideradas y para cualquier altura de UPR de entre las consideradas.

El último caso analizado corresponde a un acuerdo vertical convexo presente en la muestra de densidad correspondiente a frecuencia de escaneo de 40 kHz. En este caso, cabe destacar el hecho de que los bajos ángulos de incidencia de la visual sobre la plataforma permiten una identificación de esta como obstáculo a la visión en un 100% de las visuales analizadas para cualquier dimensión de UPR. No obstante, el análisis teórico llevado a cabo muestra una posible insuficiencia en la densidad de puntos que es necesario tomar en consideración para dimensiones de 0,10 m y 0,20 m de anchura de PV, y de 0,03 m de altura y profundidad de UPR para esta frecuencia de escaneo de 40 kHz, y de 0,10 m de anchura de PV y 0,03 m de altura y profundidad de UPR para densidad de muestra D4, ambas con velocidad máxima de circulación del vehículo LiDAR de 70 km/h.

De acuerdo con lo anterior y con la experiencia adquirida en la toma de datos, se propone el siguiente procedimiento de captura:

- Las condiciones meteorológicas deben ser buenas especialmente en lo referente a la ausencia de viento (que pueda introducir vibraciones en el sistema o generar un excesivo número de objetos o partículas de polvo en suspensión) y también en ausencia de lluvia o incluso suelo mojado (por la ausencia de rebote del haz láser que provoca la presencia de agua).
- Para reducir el trabajo posterior de depuración de la muestra, la carretera debe encontrarse preferiblemente en baja intensidad de tráfico en el momento del escaneo. La presencia de tráfico introduce un “ruido” en los datos LiDAR correspondiente al rebote del haz láser sobre los vehículos que debe eliminarse para no contaminar los resultados de visibilidad obtenidos.
- La toma de datos debe realizarse a ser posible con captura simultánea de imágenes lo que permite la posterior comprobación de obstáculos en el proceso de validación manual. La mayoría de sistemas LiDAR mobile incluyen además cámaras digitales de elevada resolución.
- A priori, si la carretera es de alta intensidad de tráfico, la toma de datos debe realizarse en período nocturno aunque ello suponga la ausencia de imágenes de comprobación.

- Cuando las características del sistema LiDAR sean de escaneado a frecuencias de 40 KHz o inferiores, las velocidades de circulación deben ser las mínimas compatibles con el tráfico y la seguridad de los operadores. Velocidades de 40 km/h suponen densidades de muestra equivalentes a un sistema del doble de frecuencia circulando a 80 km/h.
- En equipos de baja frecuencia (40 KHz o inferiores), el escaneado debe producirse a su frecuencia máxima y a la mínima velocidad posible; sin embargo, en equipos capaces de escanear a frecuencias de 1MHz o superiores, la frecuencia debe escogerse en función de las características de la vía, teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente y los tiempos de proceso así como las necesidades de almacenamiento de datos posteriores. Así, en una carretera de montaña donde las velocidades de circulación esperables son de 40 km/h no es recomendable la adopción de la máxima frecuencia en este tipo de sistemas.

Dadas las tasas de éxito obtenidas en los casos analizados, se recomienda la adopción de las dimensiones mínimas que generan un éxito del 100% en todos los casos: anchura del PV de 0,50 m y altura y profundidad de 0,05 m para la UPR.

Finalmente, circunscribiendo estas recomendaciones a los casos analizados, de acuerdo con el análisis de densidades llevado a cabo se recomienda una frecuencia de escaneado total mínima de 125 KHz (equivalente a la densidad D4, 1MHz/8) con velocidad máxima de circulación de 60 km/h (valor ligeramente más conservador que la máxima velocidad registrada durante la toma de las muestras establecida en 70 Km/h). Frecuencias mayores pueden ser empleadas a mayor velocidad de circulación para aumentar el rendimiento siempre que la geometría de la carretera lo permita. Aumentar en exceso esta frecuencia de escaneado, no resulta conveniente debido al incremento proporcional en los tiempos de proceso requeridos, no habiéndose encontrado una diferencia sustancial de las tasas de éxito en la detección de obstáculos a la visión.

6 Conclusiones

La existencia de una visibilidad adecuada a las condiciones reales de operación es condición indispensable para alcanzar un diseño geométrico seguro. Las distancias de visibilidad requeridas para tareas inherentes a la conducción, tales como la orientación, la parada, el adelantamiento o el cruce, constituyen un parámetro esencial en el diseño geométrico de nuevas carreteras, formando parte importante de todas las guías de diseño a nivel internacional.

Sin embargo, una vez construida la carretera y durante el tiempo en que esta se encuentra en servicio, muchas otras circunstancias de su entorno condicionan la visibilidad realmente disponible. La disposición de la señalización o de las barreras de protección, la vegetación circundante y cambiante a lo largo del tiempo, las modificaciones y mejoras de la carretera y de su entorno inmediato llevadas a cabo durante su conservación y explotación, o las medidas de protección ambiental y contra el ruido que puedan irse adoptando, pueden modificar sustancialmente las condiciones de visibilidad realmente disponibles y diferir de aquellas que pretendieron garantizarse con su diseño geométrico inicial.

En otros casos, las carreteras en servicio son tan solo el resultado de antiguas sendas o caminos adaptados y mejorados para la circulación de vehículos automóviles. Estas carreteras ni siquiera responden a una concepción geométrica global que hayan tenido en la visibilidad, uno de sus criterios de diseño.

Existe, por tanto, una gran diferencia entre la importancia que a la visibilidad se le asigna en la definición geométrica de nuevas carreteras de acuerdo con lo establecido en las guías de diseño actuales y la forma de comprobar y controlar la idoneidad y evolución en el tiempo de la visibilidad real en carreteras existentes.

Por otro lado, dado que las mediciones de visibilidad disponible deben llevarse a cabo con el observador y el obstáculo situados sobre la calzada, su medición sistemática y periódica es una complicada y tediosa labor, no exenta de riesgos y de perturbaciones al tráfico. Los bajos rendimientos, el coste y el riesgo asociados a comprobaciones de la visibilidad llevadas a cabo por operarios de forma manual o mediante vehículos en seguimiento impiden que, hoy por hoy, formen parte común de las labores ordinarias y sistemáticas de inspección y mantenimiento de la vía.

En este contexto, las técnicas de teledetección basadas en sistemas LiDAR (Light Detection and Ranging) cuyo desarrollo está gozando de un gran impulso en los últimos años, permiten la captura masiva de puntos georreferenciados pertenecientes a las superficies del entorno inmediato de la carretera, de manera que es posible contar con información, tanto de su propia geometría, como también del resto de obstáculos que pueden impedir la visibilidad tales como barreras, señales, muros o vegetación.

Teniendo en cuenta la importancia que para la seguridad vial tiene contar con técnicas fiables para conocer las visibilidades realmente disponibles en carreteras en servicio, en la presente Tesis Doctoral se ha desarrollado y analizado una nueva

metodología de evaluación sistemática de visibilidades disponibles a partir de datos obtenidos con técnicas LiDAR. Para ello se ha hecho uso tanto de datos procedentes de escáneres láser montados en un avión (LiDAR aéreo) para la obtención de modelos digitales, como de escáneres montados sobre un vehículo automóvil (LiDAR mobile) sobre los que se ha desarrollado la nueva metodología de estimación de visibilidades.

Para la identificación de dichas obstrucciones a la visión, el sistema desarrollado introduce ciertas modificaciones sobre la hipótesis tradicional basada en la existencia o no de visión a partir del análisis de una línea visual trazada entre el observador y el punto objetivo. Se introducen así dos nuevos conceptos: Prisma Visual (PV) y Unidad Prismática Rectangular (UPR) que hace que la modelización de la visión esté basada en elementos espaciales y no lineales.

De este modo, de la nube de puntos LiDAR se consideran únicamente los puntos contenidos en una franja del espacio definida en torno a la línea visual que une el observador y el objetivo (PV). Esta franja se subdivide a su vez en unidades espaciales menores (UPR), también prismáticas, que se consideran opacas a la visión en caso de que contengan al menos un punto LiDAR en su interior.

La influencia de la densidad LiDAR resultante y de las posibles dimensiones del PV y de la UPR ha sido analizada con el fin de establecer recomendaciones sobre las dimensiones y la frecuencia que generan menores tiempos de proceso pero mantienen a la vez tasas de éxito del 100% en la identificación de los obstáculos a la visión.

Considerando la maniobra de parada y los casos de obstrucción a la visión analizados, de presencia habitual en carreteras consistentes en taludes de desmonte o vegetación ubicados en el interior de una curva y acuerdos verticales convexos, se han realizado a tal efecto un total de 4.200 cálculos correspondientes a diferentes combinaciones de densidad de muestra y dimensiones de PV y de UPR, habiéndose concluido en recomendar frecuencias de escaneado LiDAR mobile mínimas de 125 KHz a velocidades de circulación máximas de 60 km/h, así como dimensiones de anchura del PV y altura y profundidad de la UPR de 0,50 m y 0,05 m, respectivamente. Mayores velocidades de circulación del vehículo sensorizado o menores frecuencias de escaneado, pueden traducirse en falsas penetraciones de la visión y estimaciones erróneas de la visibilidad disponible.

En los casos sometidos a estudio, se han analizado y cuantificado también los efectos de la consideración de un prisma visual formado por unidades prismáticas rectangulares en lugar de la tradicional línea visual, estableciendo la baja influencia que las dimensiones consideradas tiene en los resultados de visibilidad disponible.

Los resultados de visibilidad de parada obtenidos con la nueva metodología, han sido asimismo comparados con los obtenidos por las tradicionales técnicas basadas en modelos digitales del terreno (MDT) y modelos digitales de superficies (MDS) sobre los que se aplica software específico de diseño de carreteras (en este caso software comercial Clip

W). Para ello, se han llevado a cabo un total de 1.950 cálculos correspondientes a 650 puntos de observación a lo largo del eje de un tramo de carretera existente. Teniendo en cuenta que tanto los MDT como los MDS han sido obtenidos a partir de datos LiDAR, aéreo en el primer caso, y aéreo y mobile combinados en el segundo, la nueva metodología se ha mostrado más restrictiva en los resultados de visibilidad disponible en un 85,66% de estos puntos de observación. En este caso, cuando la metodología de PV arroja el menor valor de visibilidad disponible de entre las metodologías sometidas a estudio comparativo, la diferencia de visión que provoca con respecto al empleo de MDT y MDS toma además valores importantes en un porcentaje no despreciable de estaciones de observación. Así, en un 23,8% de los casos la diferencia de visibilidad disponible entre la metodología de PV y la mínima de las visibilidades obtenidas por MDT y MDS, es superior a los 50 m, superando los 100 m en un 5,2% de los casos.

La sobreestimación de visibilidad pone por tanto de manifiesto, la debilidad de las estimaciones de visibilidad disponible que puedan realizarse en la práctica ingenieril en carreteras en servicio atendiendo exclusivamente a perfiles transversales procedentes de MDT o incluso de MDS generados con datos LiDAR, siendo que este tipo de modelos cuentan con datos de partida de mayor volumen y por tanto también, con mayor detalle en la definición del entorno próximo de la carretera, que los correspondientes a modelos que puedan ser obtenidos a partir de levantamientos topográficos o restituciones fotogramétricas convencionales.

El estudio comparativo se ha extendido a todas las parejas de metodologías PV, MDT y MDS, lo que ha permitido obtener además conclusiones sobre los resultados de visibilidad obtenidos por ellas analizadas dos a dos. De esta forma, como era de prever, sobre el número total de observaciones el mayor porcentaje en que las visibilidades disponibles son mayores, corresponden al MDT, siendo progresivamente más restrictivos los valores por MDS y por PV. Sin embargo, existe un cierto porcentaje en que esto no es así. Un estudio pormenorizado de estos casos concluye en la importancia que sobre los resultados tiene la precisión planimétrica y altimétrica de los datos de partida, así como el tamaño de celda en la rasterización que forma parte de la obtención de los modelos digitales MDT y MDS, lo que puede provocar en ciertos casos aunque con un porcentaje sobre el total reducido, una visibilidad por PV mayor que la correspondiente a MDT (9,52%) y a MDS (9,51%).

Conscientes además de la importancia de relativizar los resultados de visibilidad disponible a las necesidades de visibilidad requeridas de acuerdo con la velocidad de operación de la vía, se ha procedido a un análisis basado en la estimación de esta velocidad que proponen los modelos de Pérez et al. (2012) desarrollados en el seno del Grupo de Investigación de Ingeniería de Carreteras de la Universidad Politécnica de Valencia.

En el tramo de carretera analizado los resultados son reveladores: si la visibilidad disponible se estima a partir de software de diseño aplicado al MDT, el porcentaje de

estaciones de observación en que la visibilidad requerida es superior a la disponible es del 36,46%, ascendiendo al 43,69% cuando se aplica un MDS y al 63,69% si se consideran los resultados de visibilidad de la nueva metodología de PV propuesta. Estos valores son de nuevo representativos del nivel de infraestimación de la problemática de visibilidad que pueden introducir las técnicas existentes.

Un estudio también llevado a cabo en esta investigación ha pretendido analizar las diferencias entre las visibilidades que podrían haber sido obtenidas durante la fase de diseño de la carretera y las realmente disponibles tras su ejecución. Para ello, en ausencia de los datos geométricos del proyecto que sirvió de base a la ejecución de la carretera, se han estimado los perfiles transversales de proyecto, reflejando de la manera más fiel posible la realidad ejecutada y se han sometido a software de diseño, como si de la fase de proyecto se tratara, comparando asimismo los resultados con los obtenidos por la metodología de prismas visuales. En este caso, de nuevo se obtiene una importante sobreestimación de las visibilidades realmente disponibles. En el 90,85% de los puntos de observación la visibilidad disponible establecida en proyecto habría resultado sobreestimada, haciéndolo además en magnitudes considerables (en un 28,83% de las estaciones la diferencia de visibilidad es superior a los 50 m, y en un 14,72% lo es a los 100 m).

El interés de la metodología radica también en la forma en que se ha concebido el método empleando algoritmos de programación implementados en GvSIG y Nasa World Wind con salidas alfanuméricas en formato *xml* y gráficas *kml* legibles por otros muchos programas, y todo ello con un intuitivo sistema de colores aplicado a las visuales (verde mientras existe visión y rojo a partir del punto en que deja de haberla). Esta manera de proceder permite además de la tradicional salida gráfica plana, también la visualización tridimensional orientable por el usuario lo que facilita enormemente la interpretación y validación de los resultados, y también la identificación de la problemática de visión existente desde un determinado punto de observación.

Desde el punto de vista del autor de esta tesis, esta investigación muestra cómo se amplían las posibilidades de obtener metodologías y procedimientos novedosos para su uso en la práctica de la ingeniería de carreteras cuando se combinan conocimientos pluridisciplinarios con nuevas tecnologías, hasta hace relativamente poco tiempo, inexistentes o inaccesibles.

7 Futuras líneas de Investigación

Tal y como se ha expuesto en apartados anteriores, la visibilidad disponible forma parte intrínseca de la concepción y el diseño de nuevas carreteras atribuyéndole un papel esencial en la determinación de muchas de sus características geométricas. En carreteras existentes, sin embargo, el seguimiento de esta importante cualidad, cambiante con el tiempo, no dispone de la misma atención debido fundamentalmente a la falta de procedimientos de evaluación sistemática.

La metodología propuesta en esta tesis puede convertirse en una herramienta fundamental para el estudio de la seguridad vial y para el mejor conocimiento de la influencia de la visibilidad realmente disponible en el comportamiento operacional de la vía.

El número y diversidad de nuevas investigaciones que pueden iniciarse con un conocimiento preciso de la visibilidad es enorme. Considérese por ejemplo el hecho de que diferentes guías de diseño internacionales establezcan diferentes distancias de visibilidad de parada, cruce o adelantamiento como seguras sin que pueda establecerse una relación directa con la accidentalidad realmente producida si no se dispone de un registro preciso de esa visibilidad. Conseguir unas u otras distancias de visibilidad tiene, sin embargo, un impacto evidente sobre los costes de construcción de la carretera. Son necesarias, por tanto, investigaciones que establezcan con mayor precisión relaciones entre visibilidad disponible y accidentalidad atendiendo a cada tipología de accidente de modo que puedan establecerse mejor los umbrales de visibilidad requerida para la seguridad de cada tipo de maniobra.

Otro ejemplo lo constituyen las investigaciones relacionadas con las maniobras de adelantamiento de vehículos más lentos y también con el adelantamiento de ciclistas como los iniciados en los últimos años por el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC). La visibilidad se ha mostrado como uno de los parámetros esenciales en este tipo de maniobras; no obstante, su conocimiento detallado a lo largo del trazado teniendo en cuenta todo tipo de obstáculos, vuelve a presentar las limitaciones propias de las actuales metodologías de medición de visibilidad. Esta circunstancia impide lo que de otro modo podría ser ampliar de forma notable el ámbito de las investigaciones y sus conclusiones.

También ha sido objeto de investigación por el GIIC la consistencia del trazado y la modelización de los perfiles de velocidad de operación. Se han correlacionado mediciones de velocidad con características geométricas de la vía entre las que podría incluirse la visibilidad real si ésta fuese de tan fácil medición como el resto de parámetros geométricos. De hecho, se observa una influencia en la operación del vehículo directamente relacionada con la percepción de las curvas, siendo que dicha percepción es una percepción visual. Difícilmente un conductor podrá modificar su velocidad con tasas de deceleración moderadas si no ha sido capaz de visualizar el grado de la curva con suficiente anticipación. También en el ámbito de los modelos y perfiles de velocidad de

operación y por tanto, en todos aquellos estudios de consistencia relacionados, la visibilidad disponible constituye de nuevo una variable no suficientemente explorada.

La investigación necesaria que sigue al conocimiento de las velocidades de operación y de las visibilidades disponibles es la correlación de esta con las sensaciones, comodidad y accidentalidad de conductores. ¿Qué déficit de visibilidad con respecto al establecido como mínimo normativo para la velocidad de operación provoca una u otra consecuencia en el conductor o en los accidentes? ¿Qué efecto tiene sobre la velocidad un despeje y por tanto una visibilidad reducida a lo largo del trazado? En una alineación recta en planta pero con acuerdos parabólicos convexos que limitan la visión, ¿qué influencia provoca esta falta de visión en la velocidad realmente practicada por los conductores? Son todas ellas preguntas que suscitan nuevas necesidades de análisis en las que la metodología desarrollada puede contribuir enormemente como herramienta para introducir en el análisis los resultados de visibilidad obtenidos.

La influencia del tamaño de observador y objetivo y su posición sobre la calzada constituyen también un punto de controversia entre ingenieros e investigadores de carreteras. De hecho, diferentes guías, establecen también diferentes alturas y posiciones y ello con implicaciones en el coste de construcción también evidentes. Esta metodología permitiría contextualizar con rapidez y precisión en casos de carreteras existentes, las diferencias entre la consecución de unas u otras visibilidades, definidas con unas u otras alturas y posiciones de observador y objetivo.

También ha sido objeto de otras investigaciones la influencia en la visibilidad disponible cuando existe coincidencia de una curva en planta con un acuerdo vertical. La nueva metodología podría incluirse en el análisis de ubicaciones diversas de carreteras existentes en que se dé esta circunstancia aportando la flexibilidad que proporcionan sus parámetros seleccionables de posición y altura de observadores y puntos objetivo.

No obstante, es necesario asimismo continuar con la misma línea de investigación iniciada ampliando la casuística analizada a otro tipo de obstáculos, a otro tipo de sistemas LiDAR y a otro tipo de carreteras.

No se ha analizado, por ejemplo, el efecto que un vallado con cierta transparencia a la visión pueda tener en un resultado real de visibilidad. Dicho vallado sería identificado como un obstáculo opaco de acuerdo con la metodología propuesta.

También resulta necesario ampliar el ámbito de las conclusiones a carreteras con características singulares tales como carreteras de montaña que discurren por zonas de masa forestal en las que es más habitual que las copas de los árboles sobrevuelen la calzada. En este caso, es de prever que la comparativa entre la nueva metodología y las metodologías basadas en MDS sufran importantes modificaciones generadas por la incapacidad de un MDS de reproducir este tipo de visibilidades bajo copas o en general bajo cualquier elemento en voladizo sobre la calzada.

En la búsqueda de la necesaria validación de resultados, debido a las dificultades de seguridad que plantea la realización de mediciones de visibilidad in situ en carreteras en servicio, en la presente investigación se han generado ficheros que puedan ser incorporados junto con la nube de puntos LiDAR, a herramientas de visualización tridimensional de modo que se contase con un procedimiento de validación pero que resulta virtual. Sin embargo, futuras investigaciones deben desarrollarse a partir de observaciones reales, que recojan las particularidades y sensaciones humanas sobre carreteras existentes de entornos y volúmenes de información visual diversos. Esta investigación, relativa al campo sensorial, permitiría entre otros, avances en el conocimiento relativos a la mejor forma de simular la visión humana y el efecto de la consideración del nuevo concepto de prisma visual en contraposición con la tradicional línea recta visual trazada entre un punto de observación y un objetivo. En este sentido, sobre los registros de dichas observaciones reales, uno de los campos de análisis podría radicar en discernir si una recta visual que pueda ser geoméricamente trazada entre el observador y el objetivo pero de forma tangente a un obstáculo a la visión situado entre ambos, permitiría realmente al conductor advertir la presencia de algo inesperado sobre la calzada y en caso contrario, qué implica esta simplificación geométrica actualmente admitida y qué aportación puede suponer la nueva consideración del prisma visual.

Por sus especiales características, la investigación podría extenderse asimismo a datos de partida procedentes de sistemas LiDAR estáticos y no montados sobre vehículo como los empleados en esta tesis. Las variables analizadas relativas a la densidad de la nube de puntos resultante estarían entonces relacionadas con las frecuencias de escaneado, con los tiempos de exposición, con las velocidades de rotación del sistema y con el número de puntos de estacionamiento, donde las “sombras” y los necesarios solapes característicos de estos equipos, introducirían también nuevas variables en el análisis.

Valencia, 18 de octubre de 2015



Fdo. José Manuel Campoy Ungría

8 Referencias

A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO); Washington, DC, USA, 2011.

Ackerman, F. and K. Kraus. Grid based digital terrain models. *Geoinformatics*, Vol.7, No.6, 2004, pp. 28-31.

Alexander, G.L. and H. Lunenfeld. *Driver expectancy in highway design and traffic operations*. Rep. No. FHWA-TO-86-1 FHWA, U. S. Department of Transportation, 1986.

Bossler, J. and C. Toth. Feature positioning accuracy in mobile mapping: Results obtained by de GPSVan. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31(Part B2), 1996, pp. 139-142.

Briese, C., N. Pfeifer, and P. Dorninger. Applications of the robust interpolation of DTM determination. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34(Part 3A), 2002, pp. 55-61.

Caliendo, C., M.Guida, and A.Parisi. A crash prediction model for multilane roads. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 39, No. 4, 2007, pp. 657-670.

Castro, M., L. Iglesias, José A. Sánchez, and L. Ambrosio. Sight distance analysis of highways using GIS tools. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 19, No. 6, 2011, pp. 997-1005.

Castro, M., J. Anta, L. Iglesias, and J. Sánchez. GIS-Based System for Sight Distance Analysis of Highways. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 3, 2014, pp. 04014005-1 - 04014005-7.

Castro, M., A. Garcia-Espona, and L. Iglesias. Terrain model resolution effect on sight distance on roads. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Vol. 59, No.2, 2015a, pp. 165-172.

Castro, M., and C. De Santos-Berbel. Spatial analysis of geometric design consistency and road sight distance. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 29, No. 12, 2015b, pp. 1-14.

Charbonnier, P., J-P. Tarel and F. Goulette, On the diagnostic of road pathway visibility. Presented at the Transport Research Arena (TRA), Brussels, Belgium, 2010.

Clark, J. and S. Robson. Accuracy of measurements made with a Cyrax 2500 laser scanner against surfaces of known colour. *Survey Review*, Vol. 37, No. 294, 2004, pp.626-638

Constantinos, A., M. and Tsakiri. 3D Laser scanning as a tool for modern road design. A methodology and applications in intersection safety analysis. Presented at 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board Washington D.C., 2012.

Doyle, F. J. Digital Terrain Models: an Overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 44, No.12, 1978, pp. 1481-1485.

Easa, S.M., and Y. Hassan. Headlight sight distance on separate highway alignments: a new approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. XXIV, Issue VI, 1997, pp. 1007-1018.

Elfes, A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. *Computer*, Vol. 22, No. 6, 1989, pp. 46-57.

Fambro, D. B., K. Fitzpatrick, and R. J. Koppa. *Determination of Stopping Sight Distances*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 400, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1997.

Felicísimo, A. M. *Modelos digitales del terreno: principios y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Ed. Pentalfa, Oviedo, 1994.

Fink, K.L., and R.A. Krammes. Tangent length and sight distance effects on accident rates at horizontal curves on rural two lanes highways. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. No. 1500. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1995, pp. 162-168.

Friess, P. *High Precision Navigation*. Chap. *Empirical Accuracy of Positions Computed from Airborne GPS Data*. Eds. Klaus Linkwitz and Ullrich Hangleiter, Stuttgart, Germany, 1989, pp. 163-175.

García, A., and M. Romero. Discussion of 3D Calculation of Stopping-Sight Distance from GPS Data by Girish Nehate and Malgorzata Rys. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 133, No.11, 2007, pp. 645-646.

Gattis, J.L., and J. Duncan. Geometric design for adequate operational preview of road ahead. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. No. 1500. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1995, pp. 139-145.

Glennon, J.C. Effect of sight distance on highway safety. *Transportation Research Board*, State of the Art Report, 6, 1987, pp.64-77.

Hassan, Y., and S.M. Easa. Modeling of required preview sight distance. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, No. 1, 2000, pp. 13-20.

Hassan, Y., S.M., Easa, and A.O. Abd El Halim. Analytical Model for Sight Distance Analysis on Three-Dimensional Highway Alignments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. No. 1523. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1996, pp. 1-10.

Hyypä, J., U. Pyysalo, H. Hyypä, and A. Samberg. Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. Presented at of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden, Germany, 2000.

Ibáñez, E., J.C. Rodríguez, and P. Aliseda. Inspecciones de Seguridad Vial. Utilización de un Sistema de Alto Rendimiento en la Adquisición de Datos de Geometría de la Vía y de sus Márgenes. Presented at III Congreso Iberoamericano de Seguridad Vial, Bogotá, Colombia, 2012.

Ingesand, H., A. Ryf , and T. Schulz. Performances and experiences in terrestrial scanning. Presented at 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zurich, Switzerland, 2003.

Ismail, K., and T. Sayed. New algorithm for calculating 3D available sight distance. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 133, No. 10, 2007, pp. 572-581.

Jha, M.K., and G.A. Karri. Road Surface Development and Sight Distance Calculation with New Visualization Methods, In: *Proceedings of the 2nd WSEAS International Conference on Sensors and Signals: Sensors, and Signals and Visualization, Imaging and Simulation and Materials Science*, Baltimore, USA, 2009, pp. 220-225.

Johansson, G., and K. Rumar. Drivers' Brake Reaction Times. *Human Factors*, Vol. 13, No. 1, 1971, pp. 23-27.

Karel, W. and K. Kraus. Quality parameters of digital terrain models. Presented at EuroSDR Seminar on Automated Quality Control of Digital Terrain Models, Aalborg, Denmark, 2005.

Karel, W., N. Pfeifer, and C. Briese. DTM quality assessment. In: *Proceedings of the ISPRS Vienna 2006 Symposium Technical Commission II*, Vienna, Austria, 2006, pp. 7-12.

Kerdudo K., V. Le Mestre, P. Charbonnier, J.P Tarel, and G. Le Potier. La visibilité géométrique: quels outils de diagnostic?. *Revue Générale des Routes et Aerodromes*, No. 865, 2008, pp. 48.

Khattak, A.J., S. Hallmark, and R. Souleyrette. Application of Light Detection and Ranging Technology to Highway Safety. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. No. 1836. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2003, pp. 7-15.

Khattak, A.J. and H. Shamayleh. Highway Safety Assessment through Geographic Information System-Based Data Visualization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 19, No. 4, 2005, pp. 407-411.

Klober, A., N. Pfeifer, P. Ogrinc, L. Todorovski, K. Ostir, and S. Dzeroski. Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from aerial laser scanner data in forested terrain. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 108, No. 1, 2007, pp. 9-23.

Krabill, W.B. GPS applications to laser profiling and laser scanning for digital terrain models. Presented at Photogrammetric Week, Heidelberg, Germany, 1989.

Kraus, K., W. Karel, Briese, C. and G. Mandlbürger. Local accuracy measures for digital terrain models. *The Photogrammetric Record*, Vol. 21, No. 116, 2006, pp. 342-354.

Lemmens, M. Airborne lidar sensors. *GIM International*, February 2007.

Lerma, J.L., M. Santana Quintero, E. Heine, and B.V. Genechten. Theory and practice on terrestrial laser scanning. Training material bases on practical applications. Ed. UPV, Valencia, Spain, 2008.

Manandhar, D. and R. Shibasaki. Geo-referencing of multi range data for vehicle-borne laser mapping system (VLMS). In: *Proceedings of the 21st Asian Conference on Remote Sensing (ACRS)*, Taipei, Taiwan, 2000, pp. 974-979.

Manandhar, D. and R. Shibasaki. Accuracy assessment of mobile mapping system. In: *Proceedings of the 24th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS)*, Busan, South Korea, 2003, 3 pp.

Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer. *Aménagement des routes principales - Guide technique*. SETRA Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), Bagneux Cedex, France, 2004.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade*. Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale, Rome, Italy, 2001.

Ministerio de Fomento. *Norma 3.1 IC Trazado*. Dirección General de Carreteras, Madrid, Spain, 2000.

Ministerio de Fomento. *Norma 3.1 IC Trazado (Borrador)*. Dirección General de Carreteras, Madrid, Spain, 2015.

Ministerio de Transporte de Colombia. *Manual de diseño geométrico de carreteras*. Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), Bogotá, Colombia, 2008.

Nehate, G. and M. Rys. 3D Calculation of Stopping-Sight Distance from GPS Data. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132, No. 9, 2006, pp. 691-698.

Olson, P.L., D.E. Cleveland, P.S. Fancher, L.P. Koystyniuk, and L.W. Schneider. *Parameters affecting stopping sight distance*. National Cooperative Highway Research Program Report (NCHRP) 270, National Research Council. Washington, D.C, 1984.

Petrie, G. Mobile mapping systems. An introduction to the technology. *GeoInformatics*, Vol. 13, No. 1, 2010, pp. 32-43.

Pérez, A. *Caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales a partir de la observación naturalística de la evolución de vehículos ligeros*. Doctoral Thesis. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, 2012.

Petrie, G. Airborne Topographic Laser scanners. *GeoInformatics*, Vol. 14, No. 1, 2011, pp. 34-44.

Pfeifer, N. A. Subdivision algorithm for smooth 3D terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 59, No. 3, 2005, pp. 115-127.

Pfeifer, N. and C.Briese, Laser scanning – principles and applications. Presented at 3rd GeoSiberia 2007 – International Exhibition and Scientific Congress on Geodesy, Mapping, Geology, Geophysics, Cadaster, GeoSiberia-2007, Novosibirsk, Russia, 2007.

Pfeifer, N., P. Stadler, and C. Briese. Derivation of Digital Terrain Models in the SCOP++ environment. Presented at OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models, Stockholm, Sweden, 2001.

Rocci, S. *Libro blanco sobre la velocidad, visibilidad y adelantamientos*. Sin Publicar, 1993.

Santos-Berbel, C., M. Castro, S. López-Cuervo, and M. Paréns-González. Distancia de Visibilidad en Carreteras: influencia de Modelos Digitales de Elevaciones y elementos de las márgenes. Presented at Congreso de Ingeniería del Transporte, Santander, Spain, 2014.

Sithole, G. and G. Vosselman. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 59, No. 1-2, 2004, pp. 85-101.

Sithole, G. and G. Vosselman. Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds. Presented at ISPRS, Workshop Lasser scanning 2005, Enschede, the Netherlands, 2005.

Sparks, W.J. The influence of highways characteristics on accident rates. *Public Works*, Vol. 99, 1968.

Sylianov, V. Comparison of the pattern of accident rates on roads on different countries. *Traffic Engineering and Control*, January, 1973, pp. 432-434.

Taiganidis, I. Aspects of Stopping-Sight Distance on Crest Vertical Curves. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 124, No. 4, 1998, pp. 335-342.

Talaya, J., E. Bosch, R. Alamus, A. Serra, and A. Baron. Geovan: The mobile mapping system from the ICC. Presented at the 4th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Junming, China, 2004.

Teizer, J., B.S. Allread, and U. Mantripragada. Automating the blind spot measurement of construction equipment. *Automation in Construction*, Vol. 19, No. 4, 2010, pp. 491-501.

Toth, C. and D. Grejner-Brzezinska. Driving the line. Multisensor monitoring for mobile mapping. *GPS World*, Vol. 14, No. 3, 2003, pp. 16-22.

Toth, C. and D. Grejner-Brzezinska. Redefining the paradigm of modern mobile mapping. An automated high precision road centerline mapping system. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 70, No. 6, 2004, pp. 685-694

Shan, J. and C. Toth. *Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing*. Ed. CRC Press, Boca Raton, USA, 2009.

Urbanik II, T., W. Hinshaw, and D.B. Fambro. Safety effects of limited sight distance on crest vertical curves. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. No. 1701. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1989, pp. 17-24.

Vosselman, G. and H. Mass. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Ed. CRC-Press, Boca Raton, USA, 2010.

Wack, R. and H. Stelz. Laser DTM generation for South-Tyrol and 3D-visualization. Presented at ISPRS, Workshop Lasser scanning 2005, Enschede, the Netherlands, 2005.

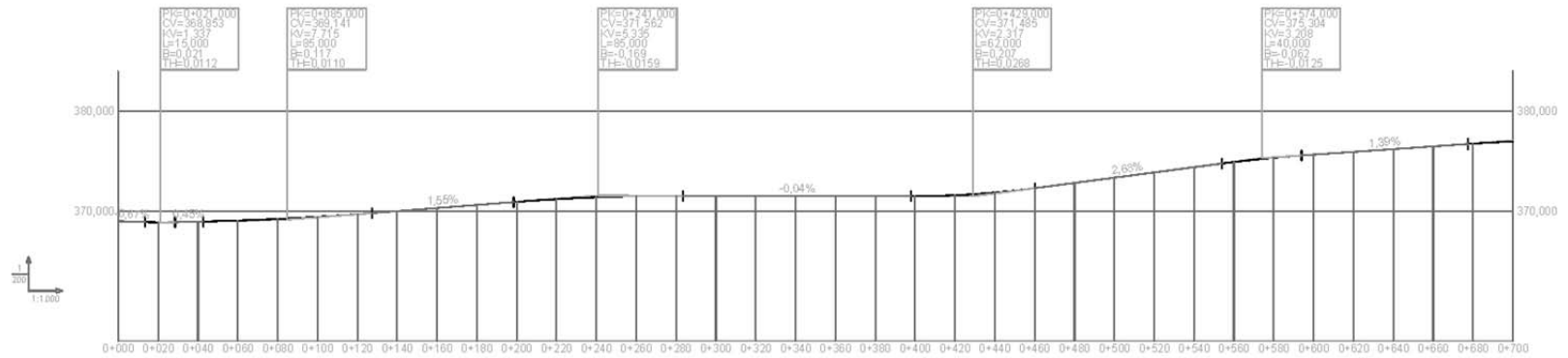
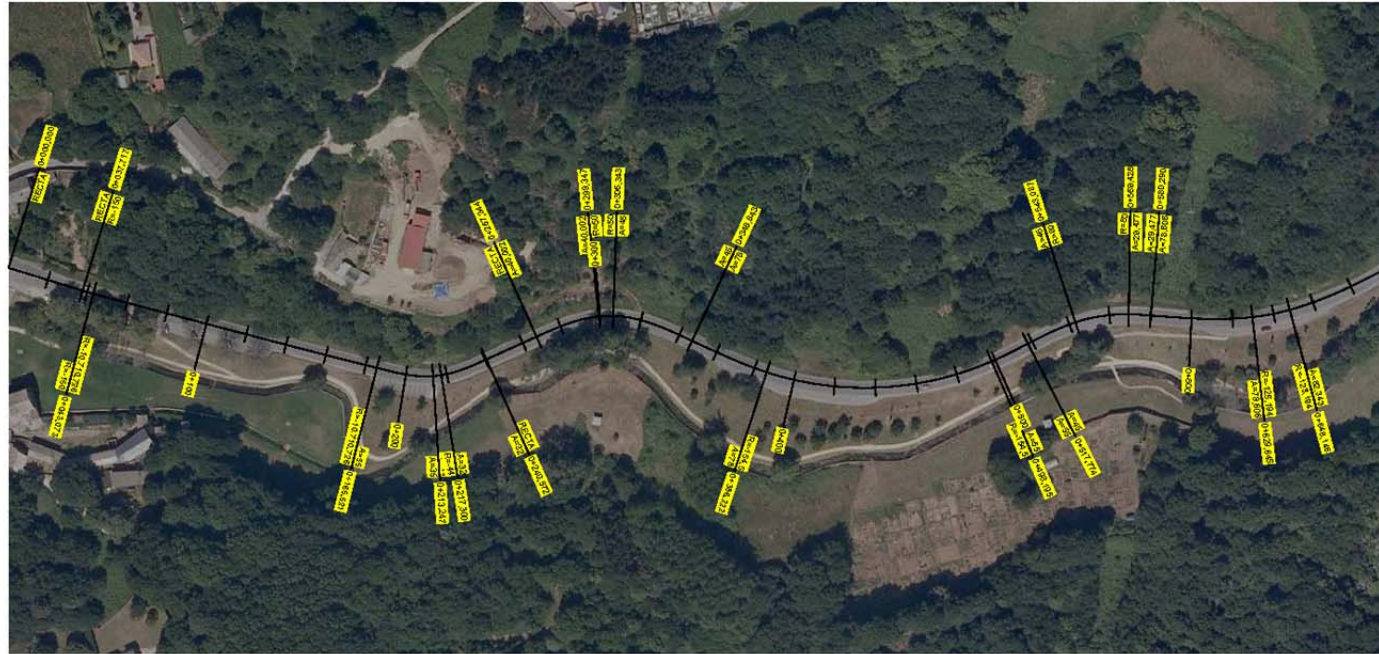
Yan, X., E. Radwan, F. Zhang, and J. Parker. Evaluation of Dynamic Passing Sight Distance Problem Using a Finite-Element Model. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 134, No. 6, 2008, pp. 225-235.

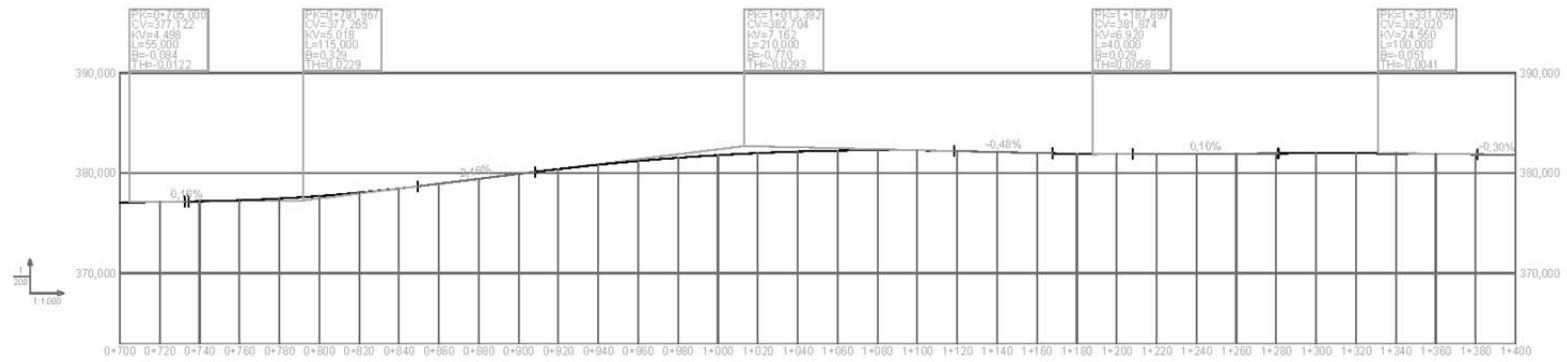
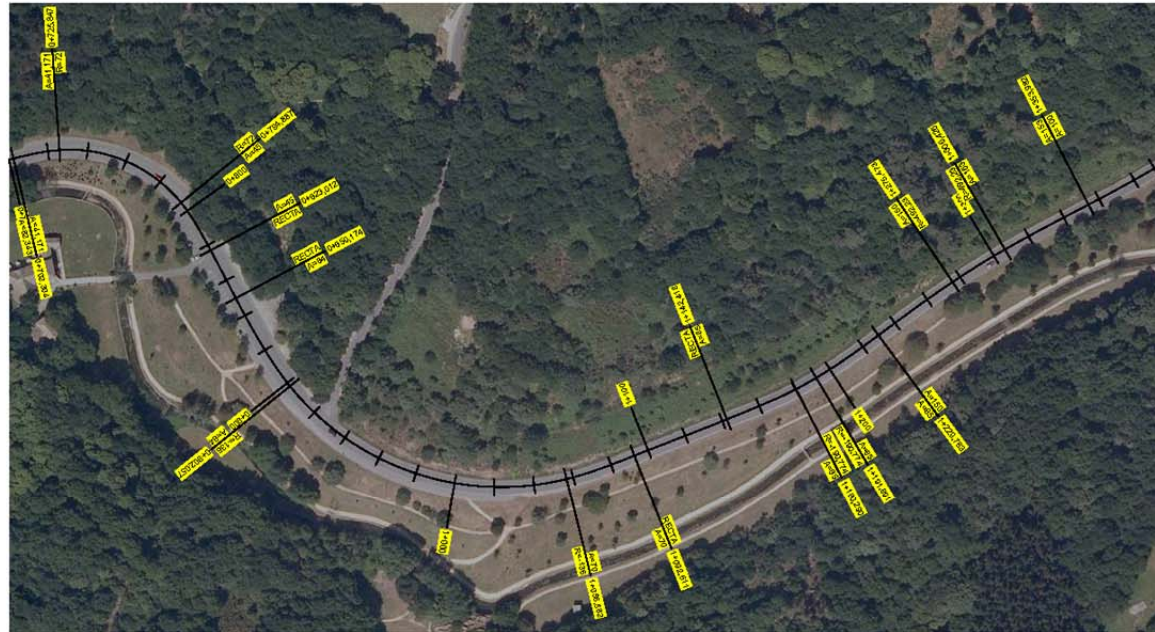
9 ANEXOS

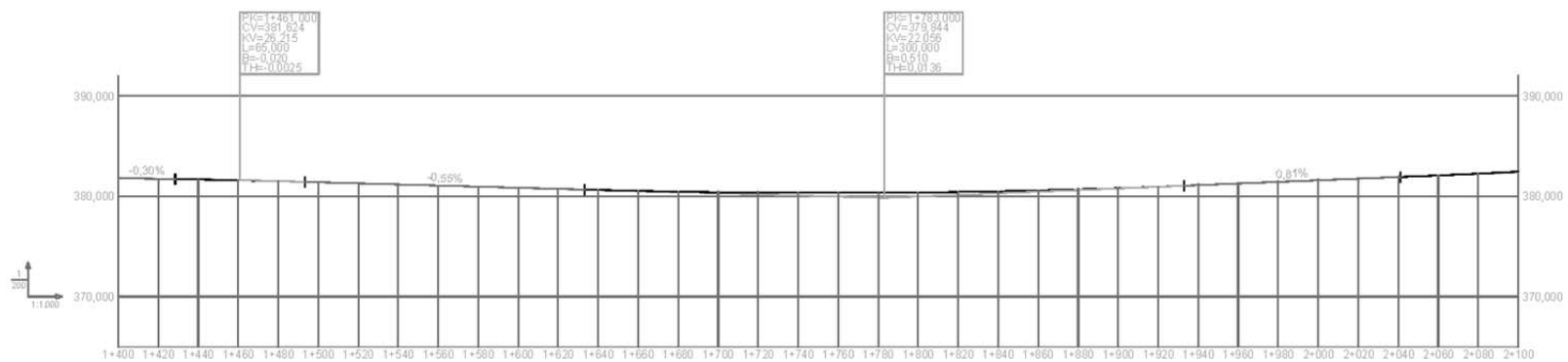
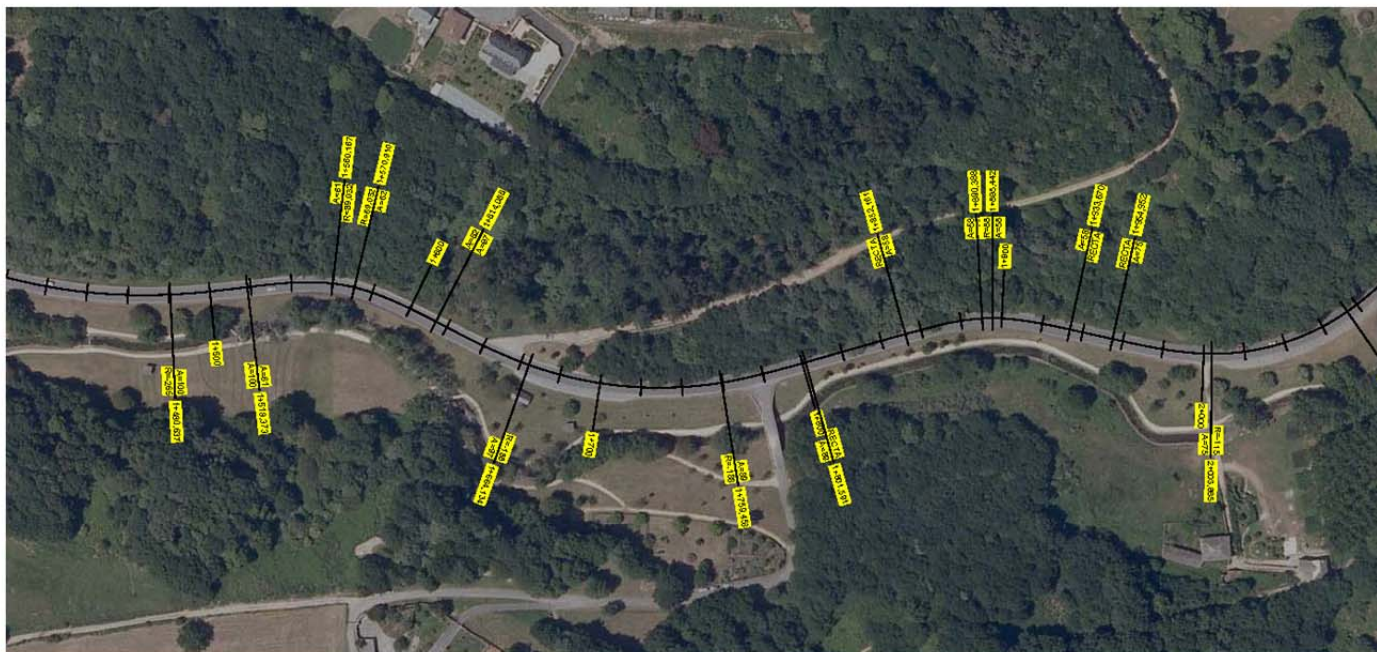
**9.1 ANEXO 1: GEOMETRÍA EN PLANTA Y ALZADO DE LOS CASOS
ANALIZADOS. CARRETERA CP-29-25 Y CARRETERA CV-35**

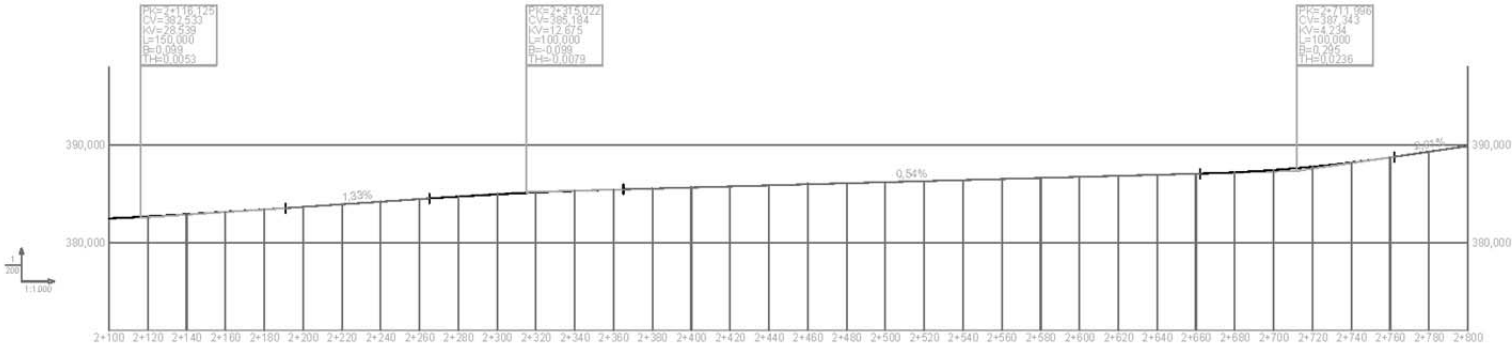
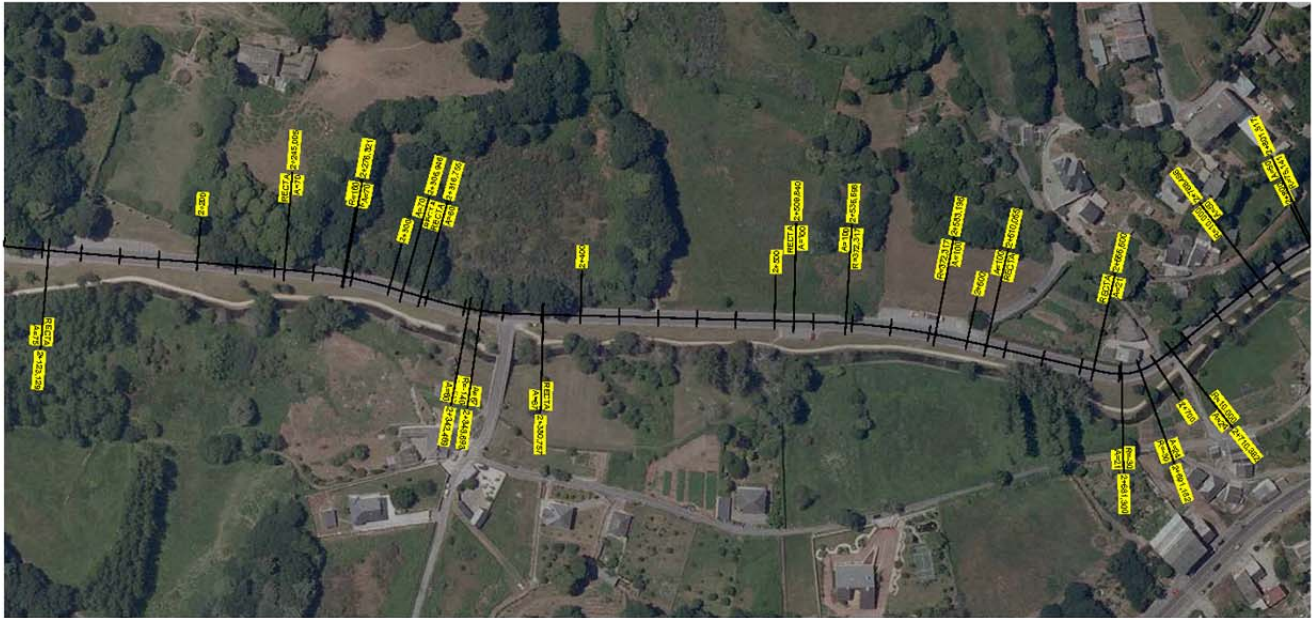
CARRETERA CP-29-25 (LUGO)

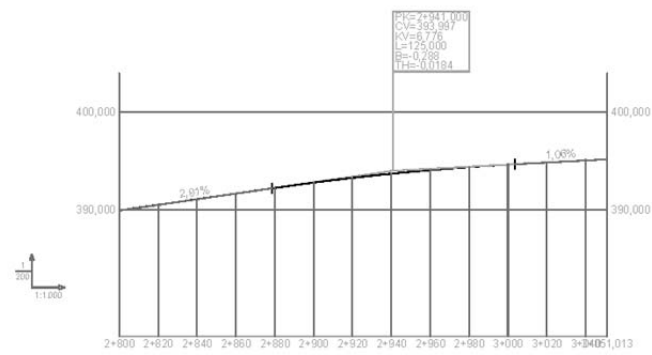
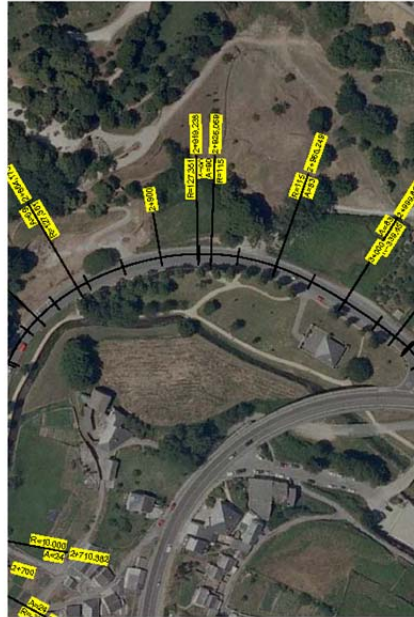
ANEXO 1 GEOMETRÍA DE LOS CASOS ANALIZADOS



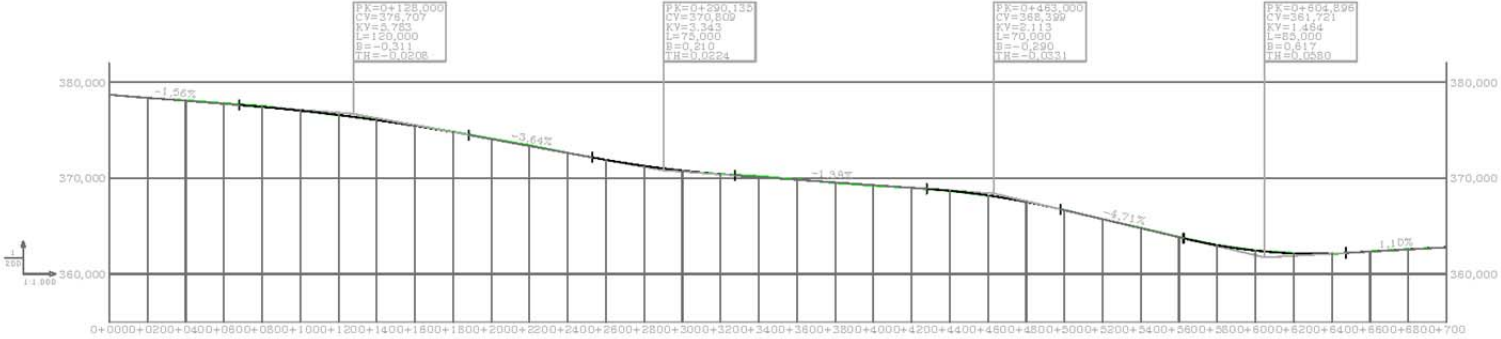
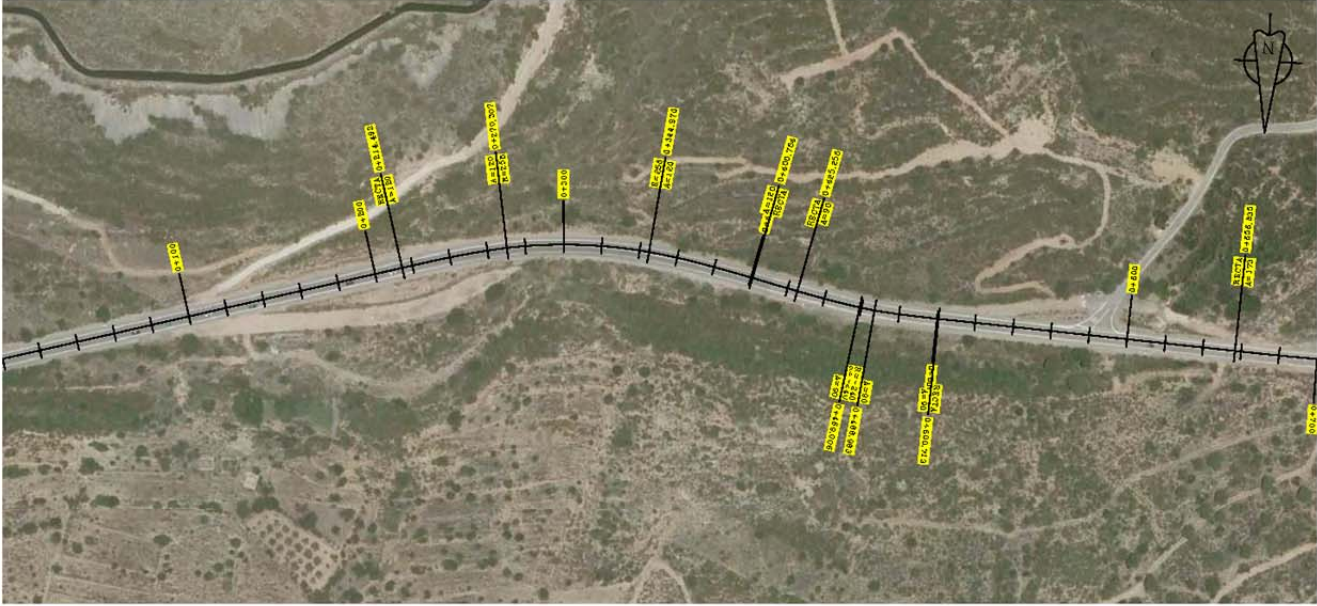


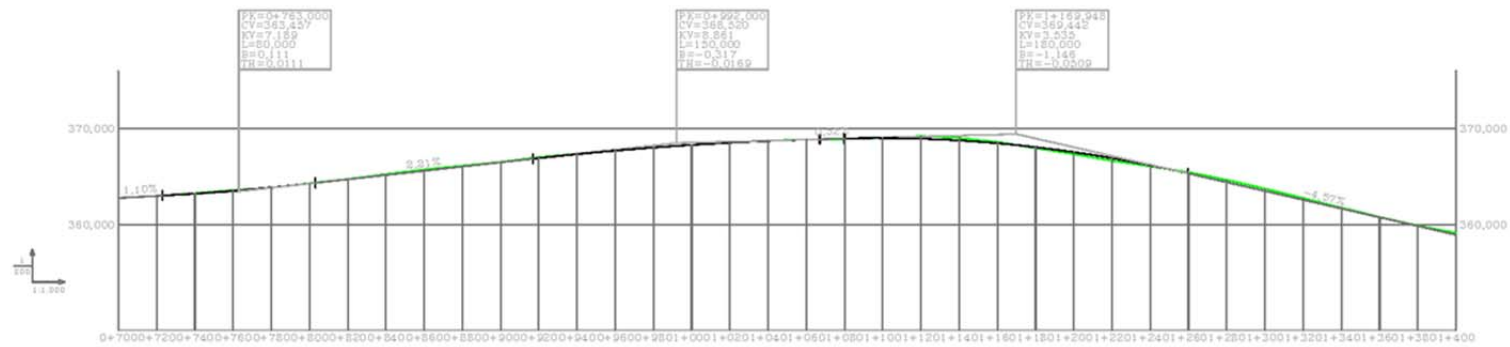
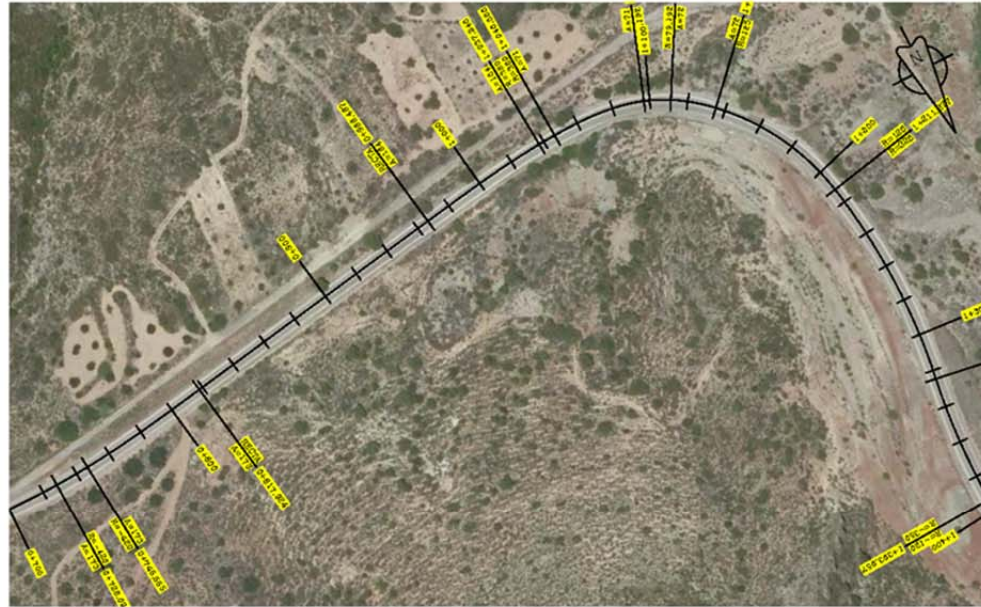


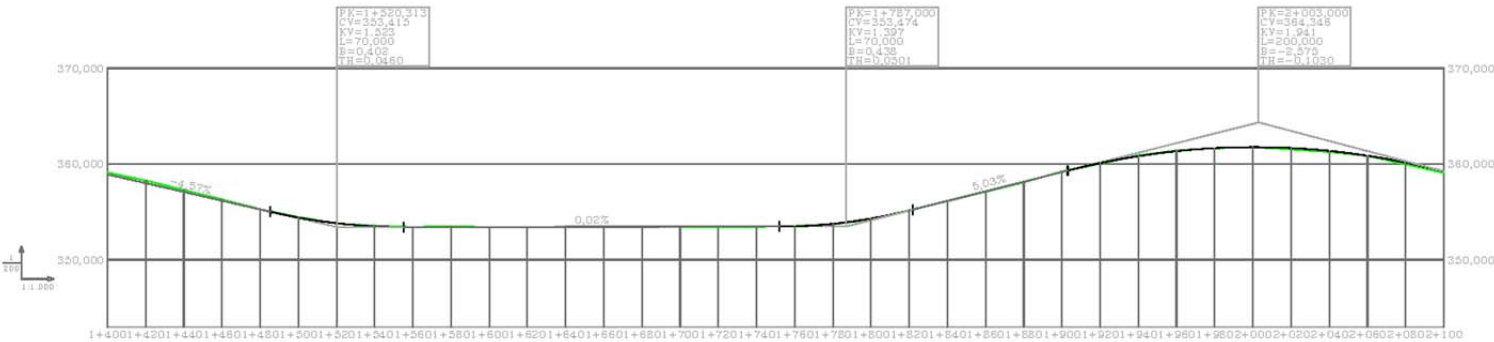


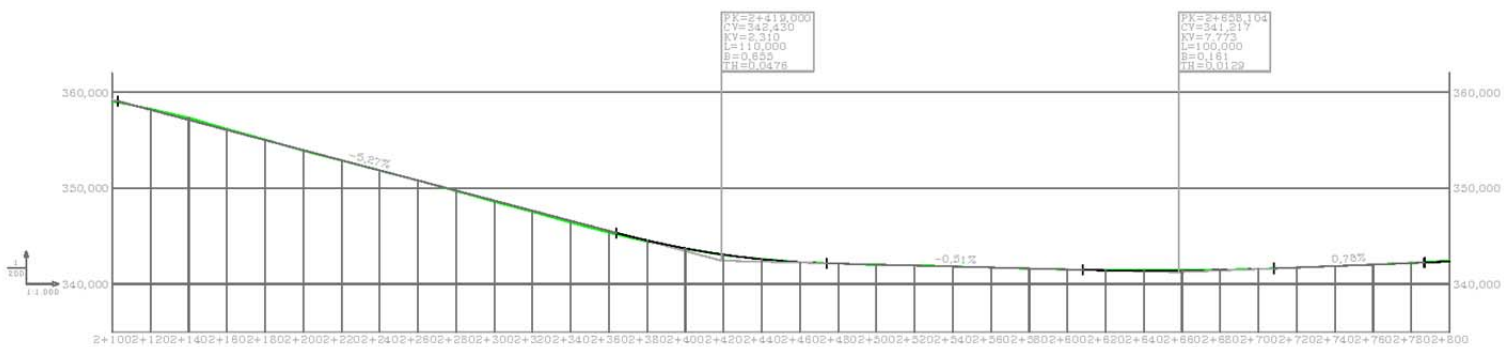
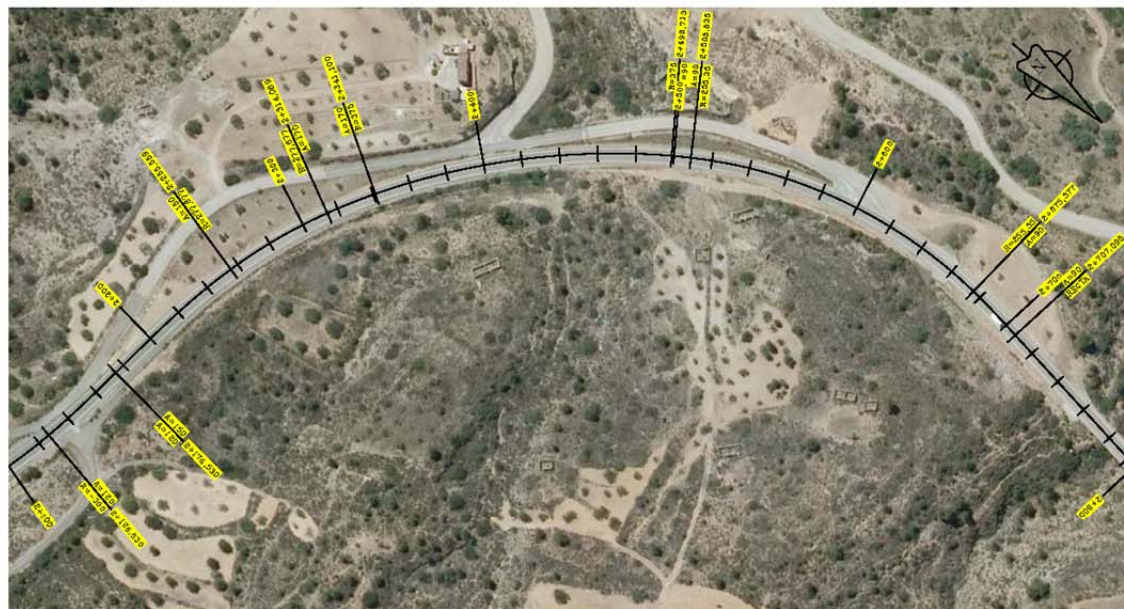


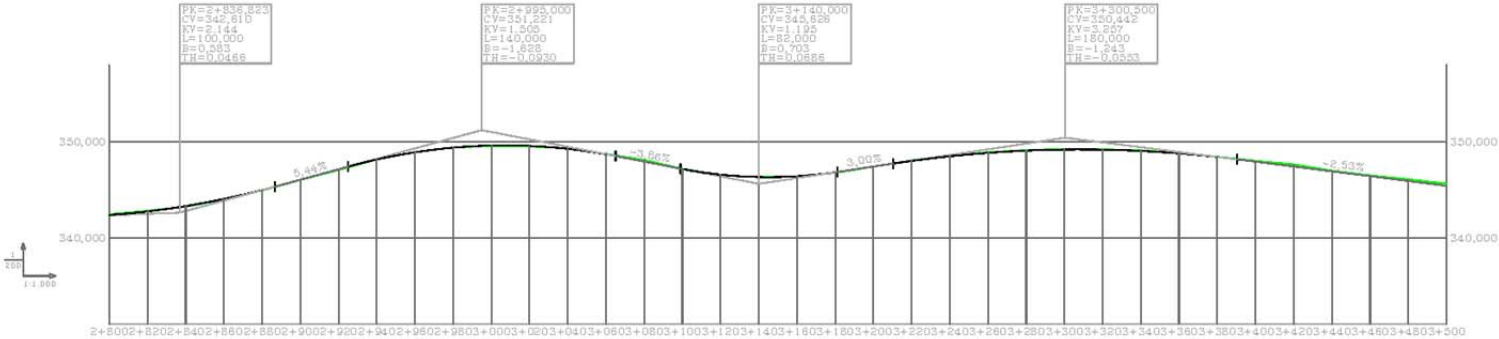
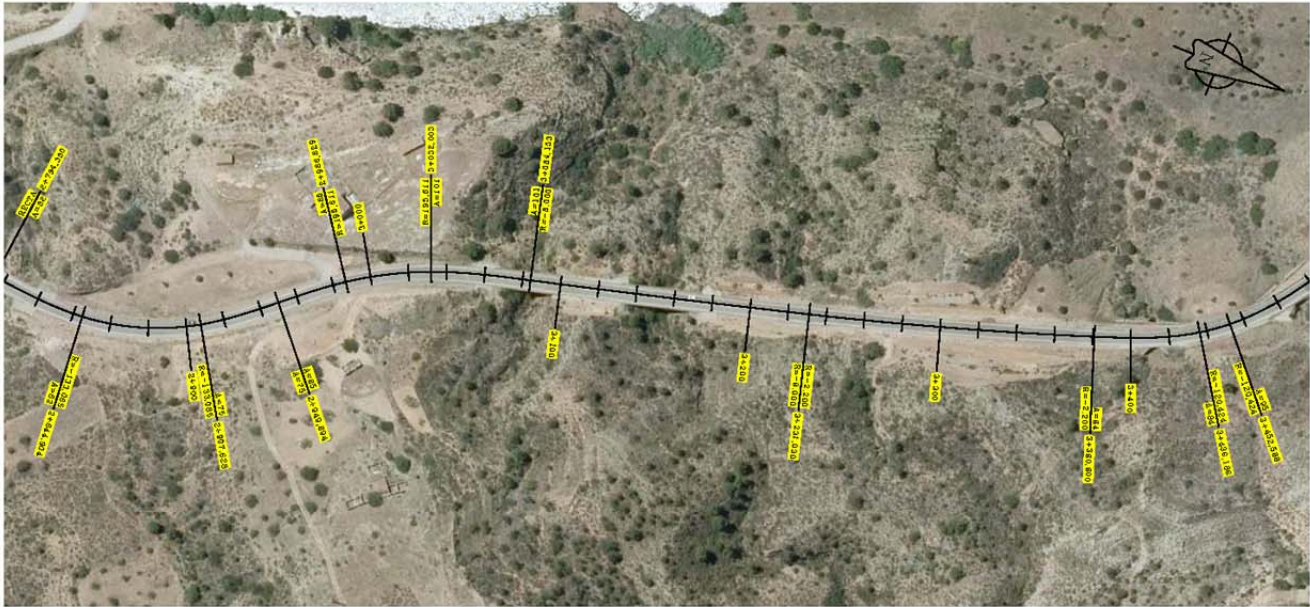
CARRETERA CV-35 (VALENCIA)

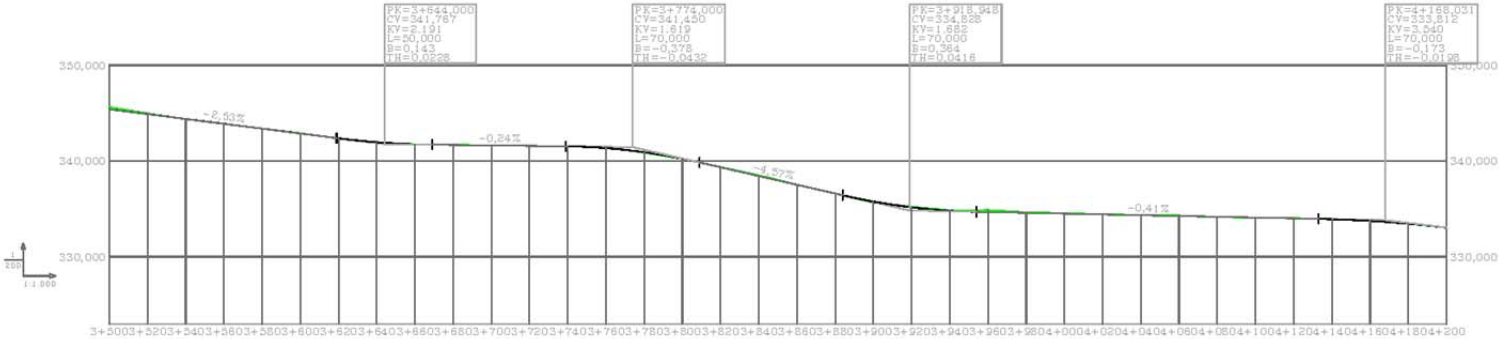


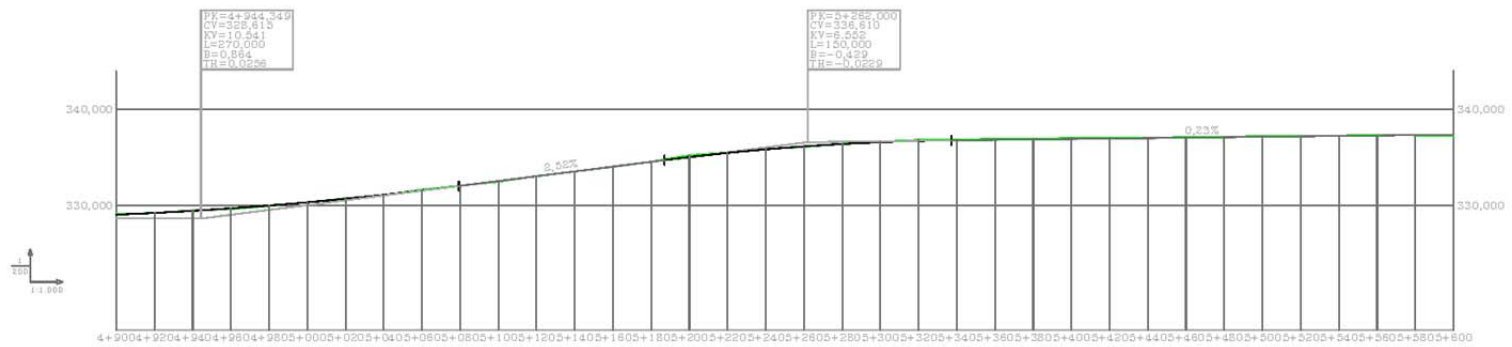
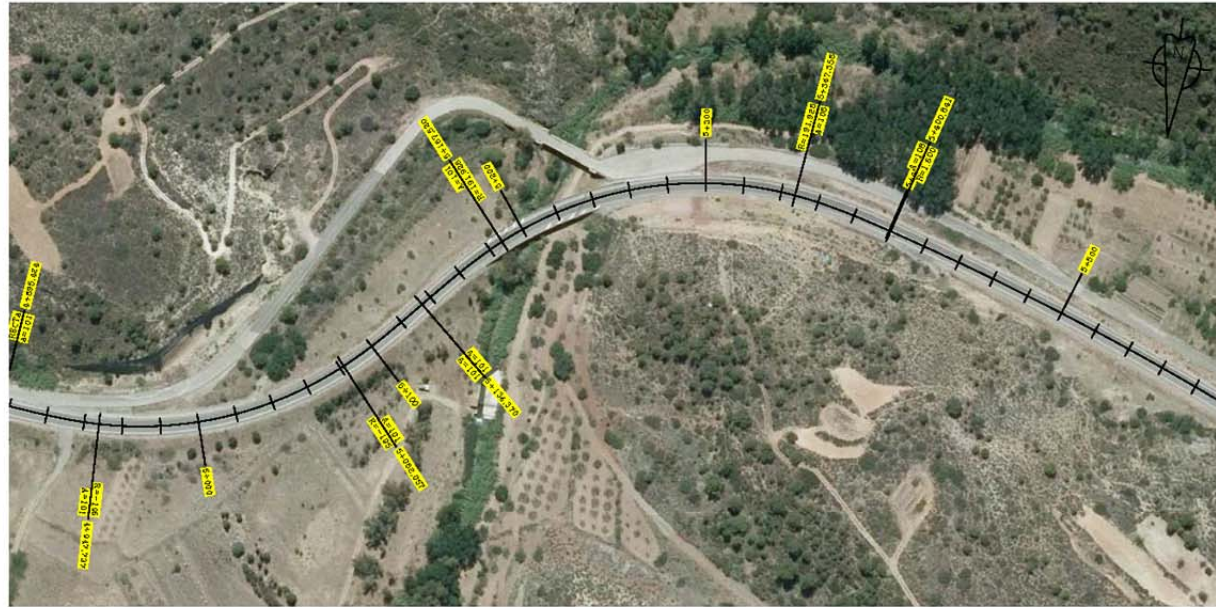


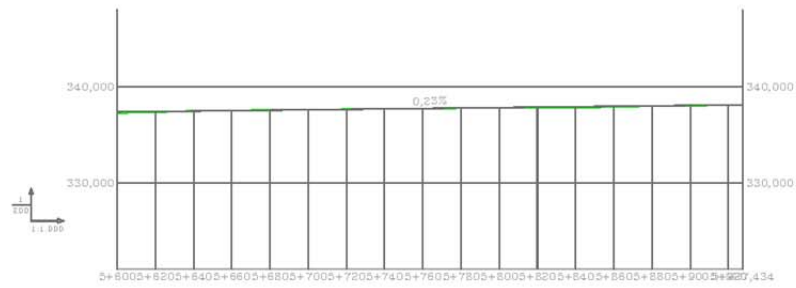
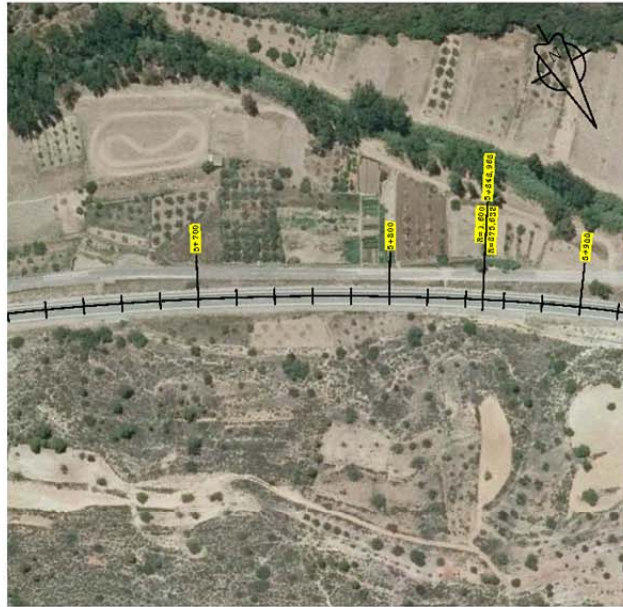




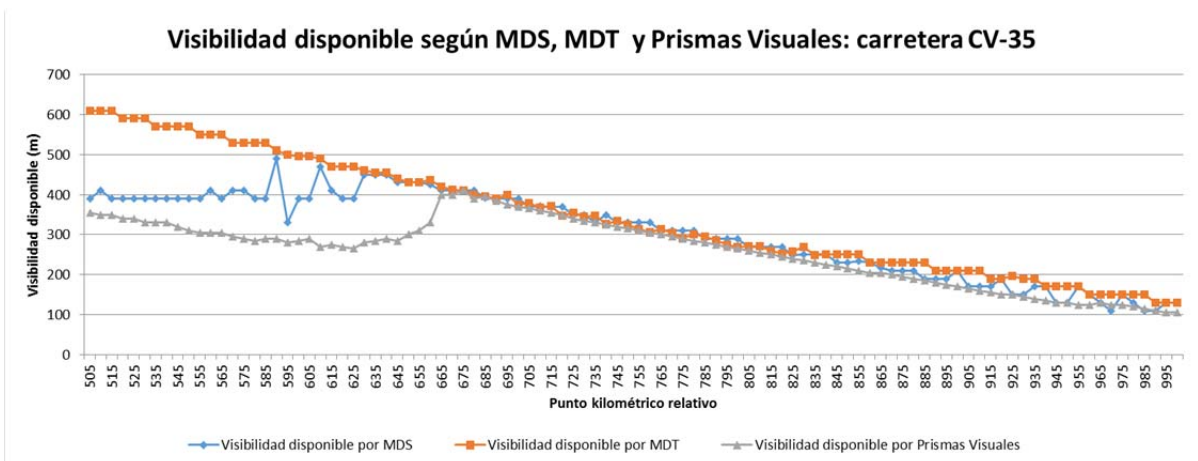
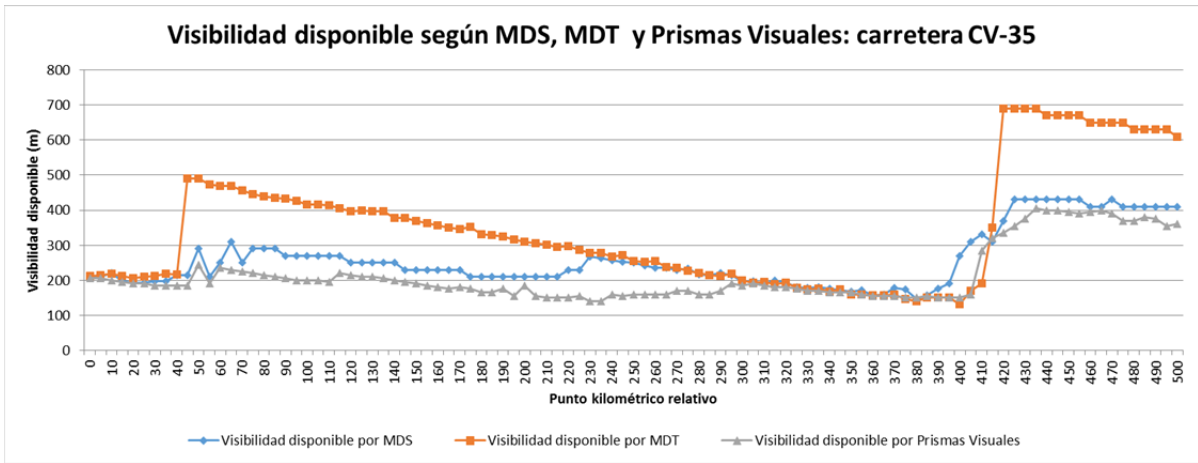
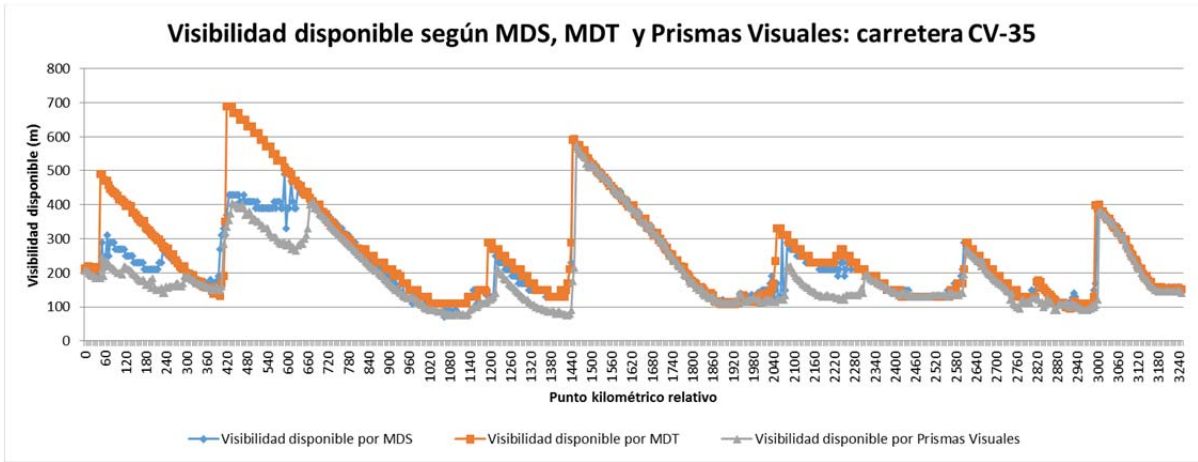


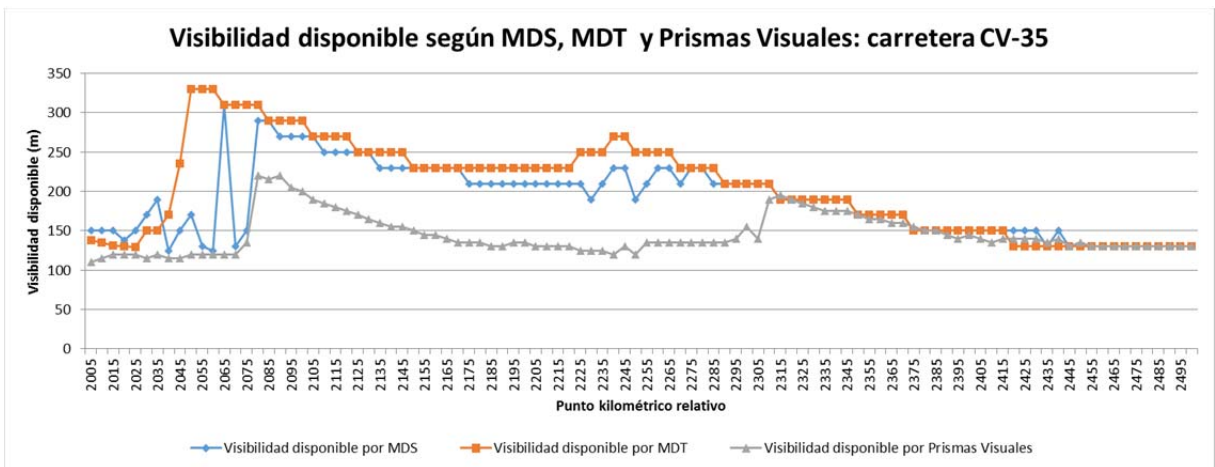
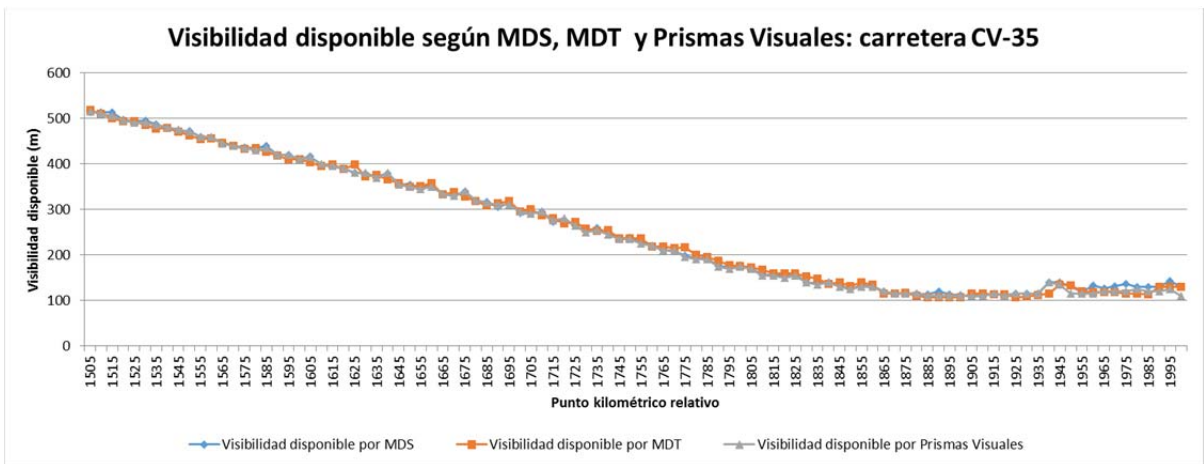
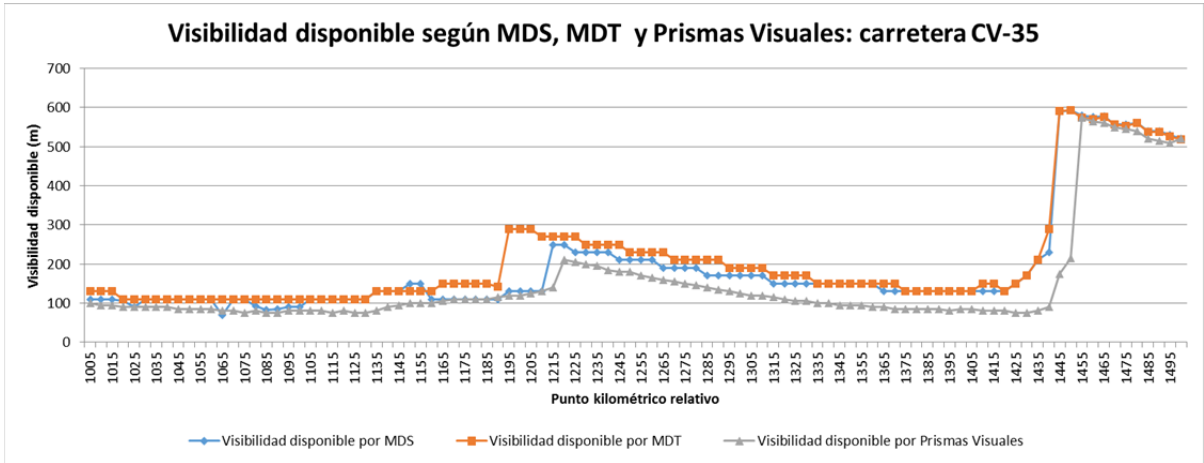


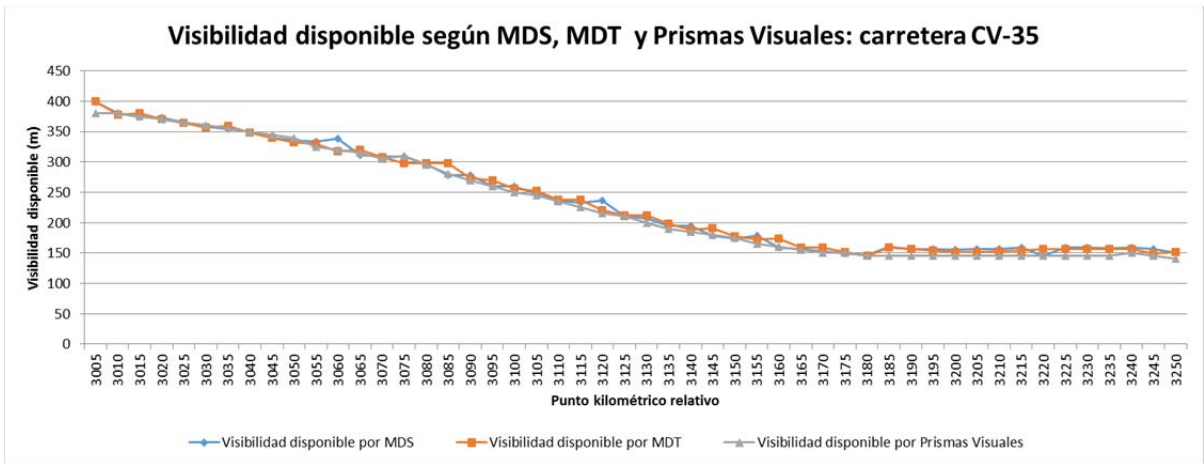
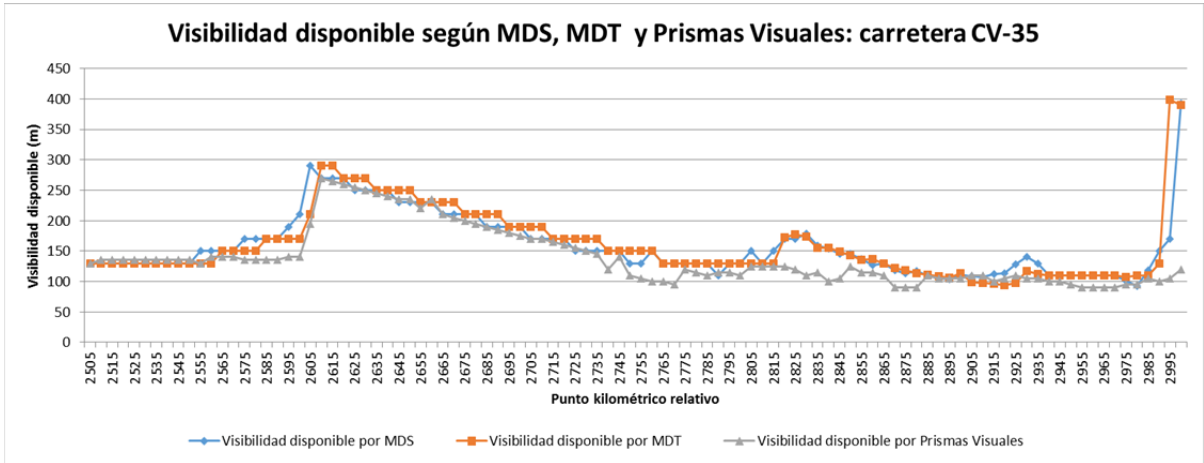




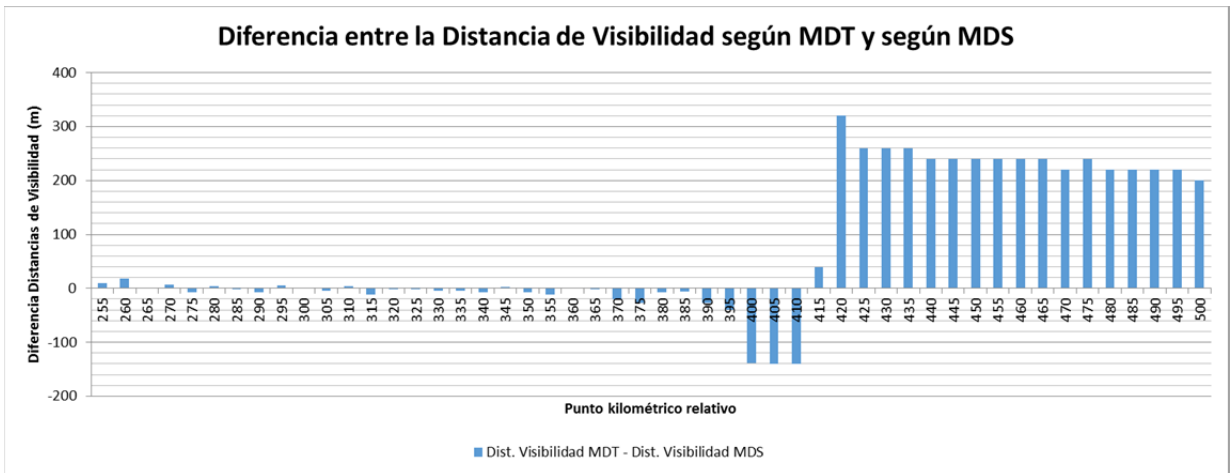
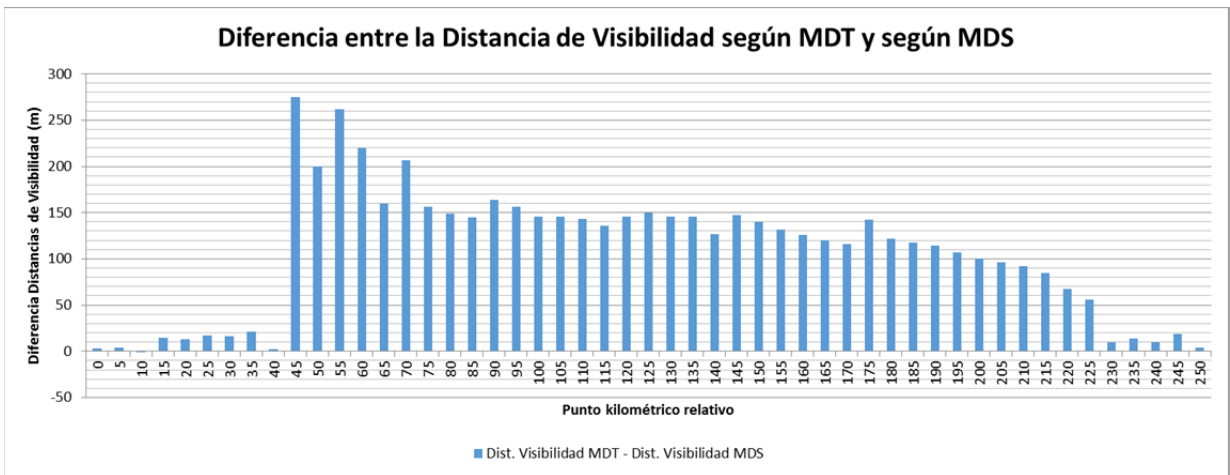
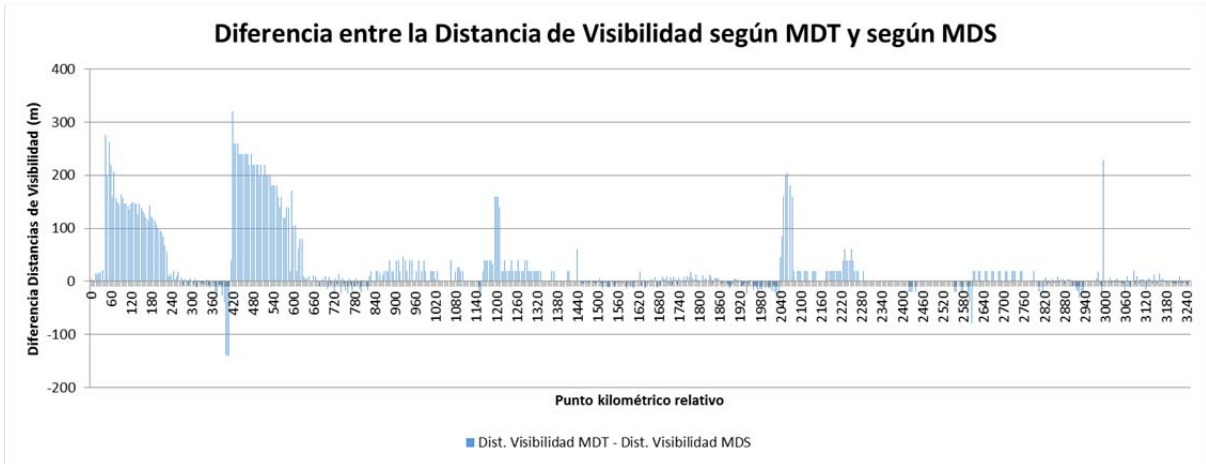
**9.2 ANEXO 2: CARRETERA CV-35. DISTANCIAS DE VISIBILIDAD
OBTENIDAS POR PV, MDT Y MDS**

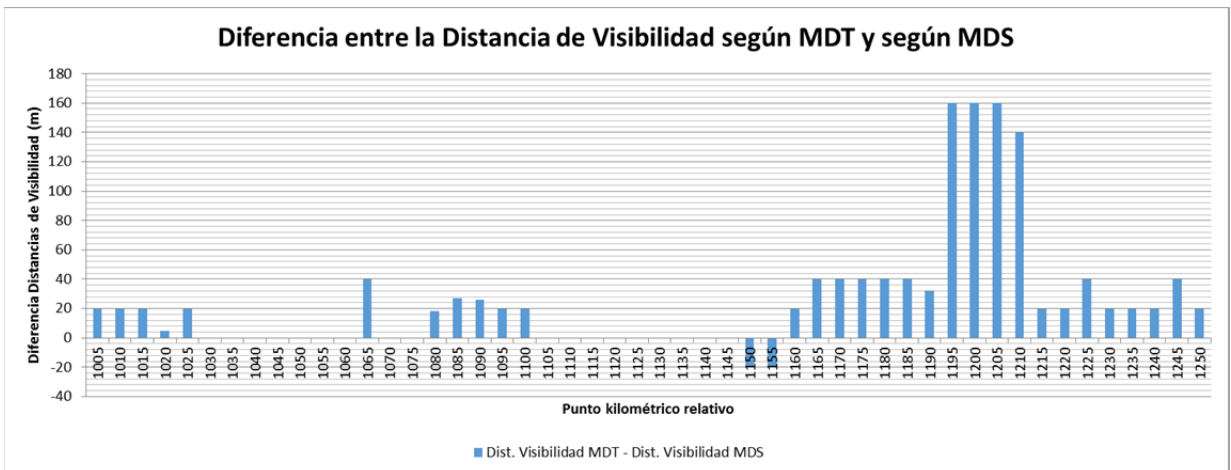
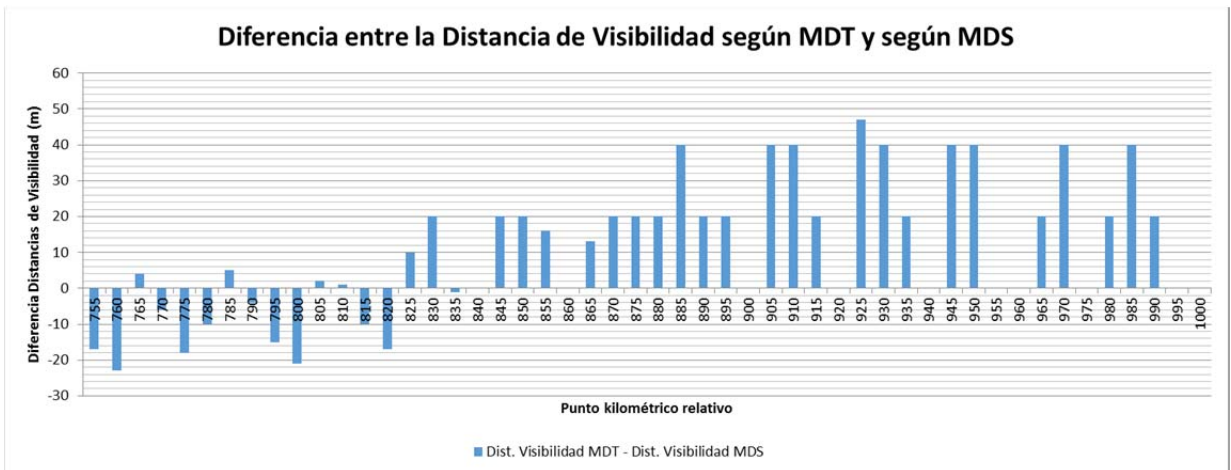
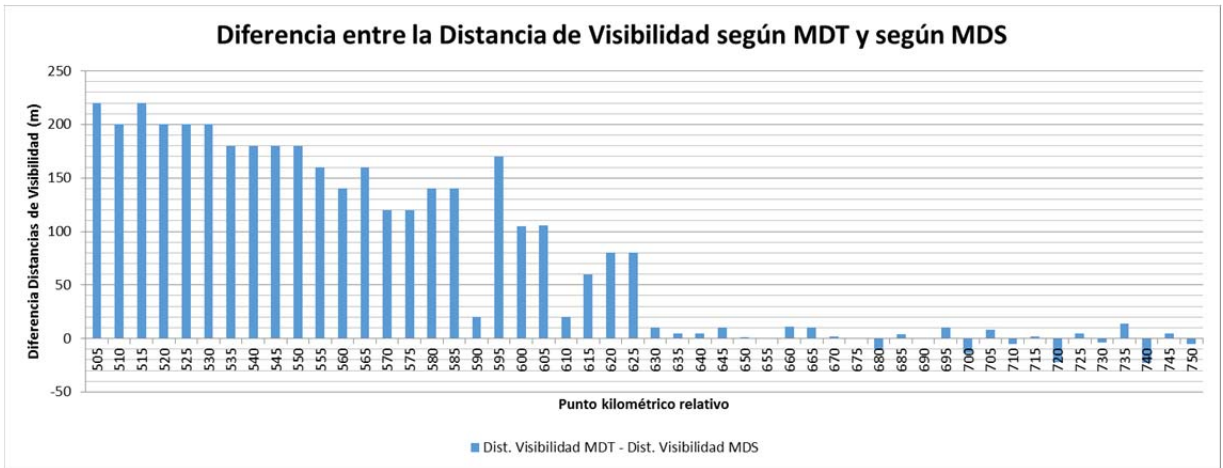


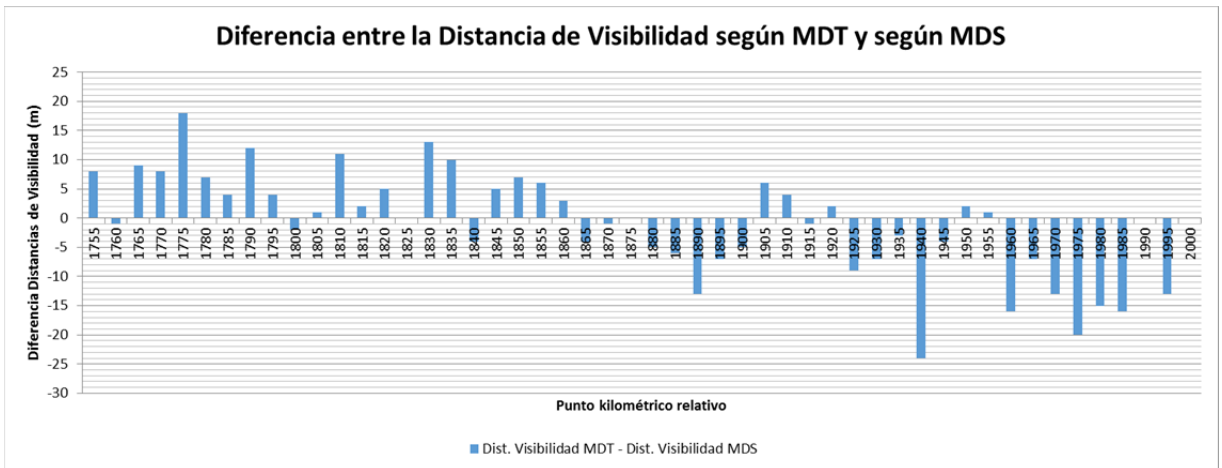
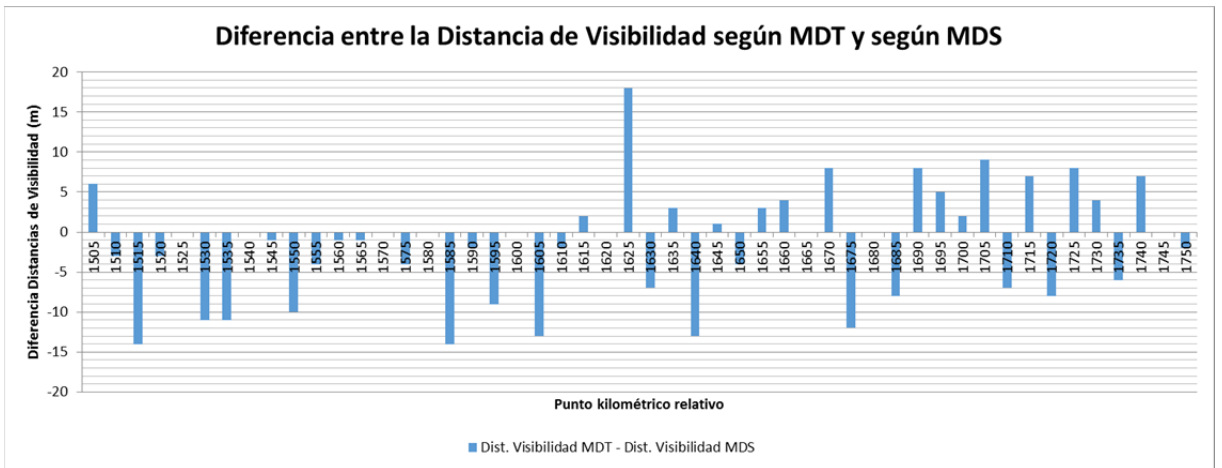
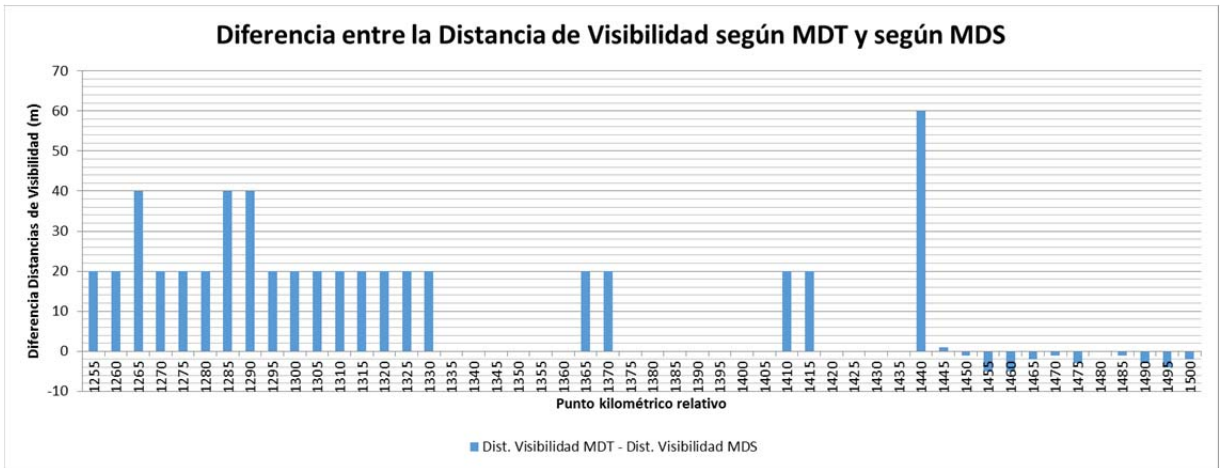


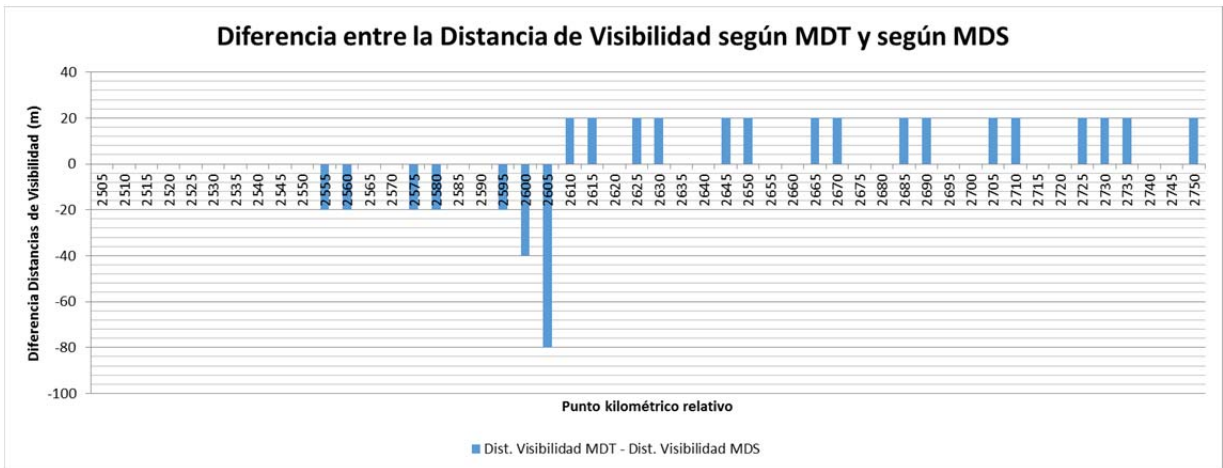
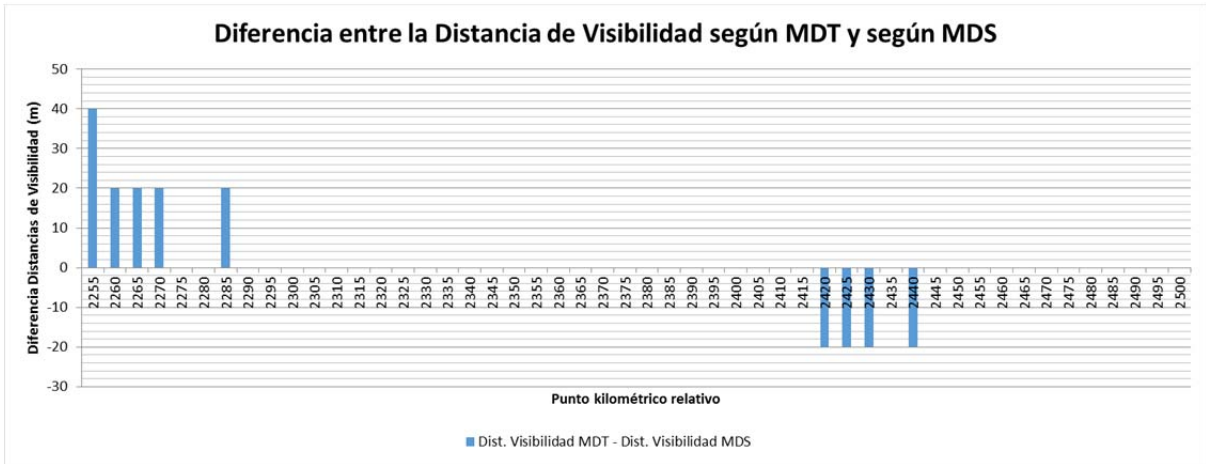
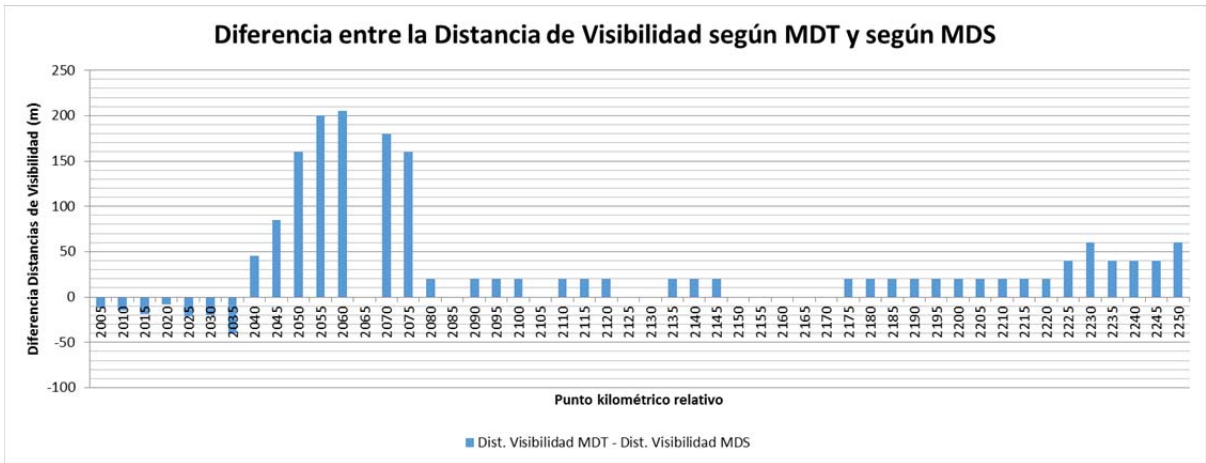


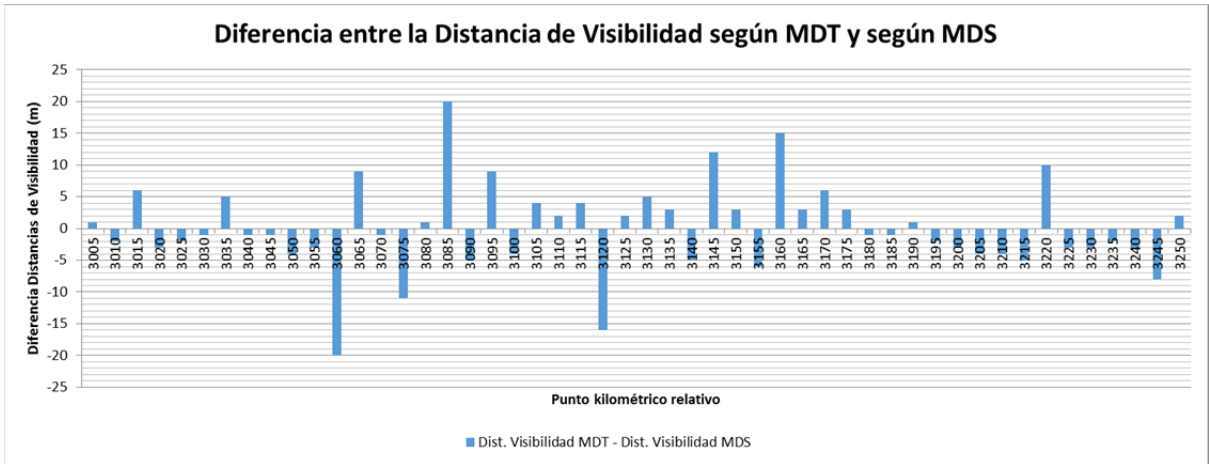
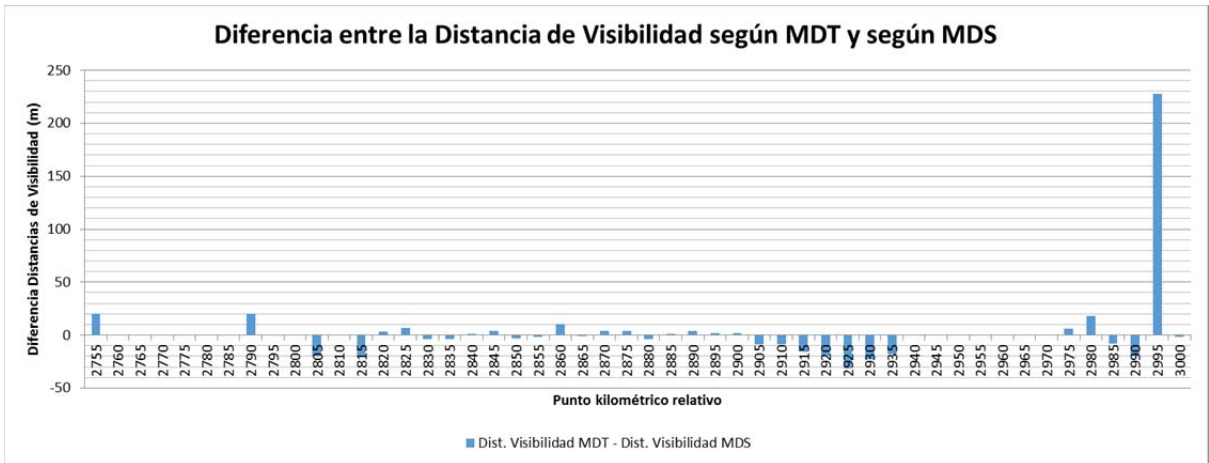
9.3 ANEXO 3: CARRETERA CV-35. DIFERENCIA ENTRE LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD OBTENIDA A PARTIR DE MDT Y A PARTIR DE MDS



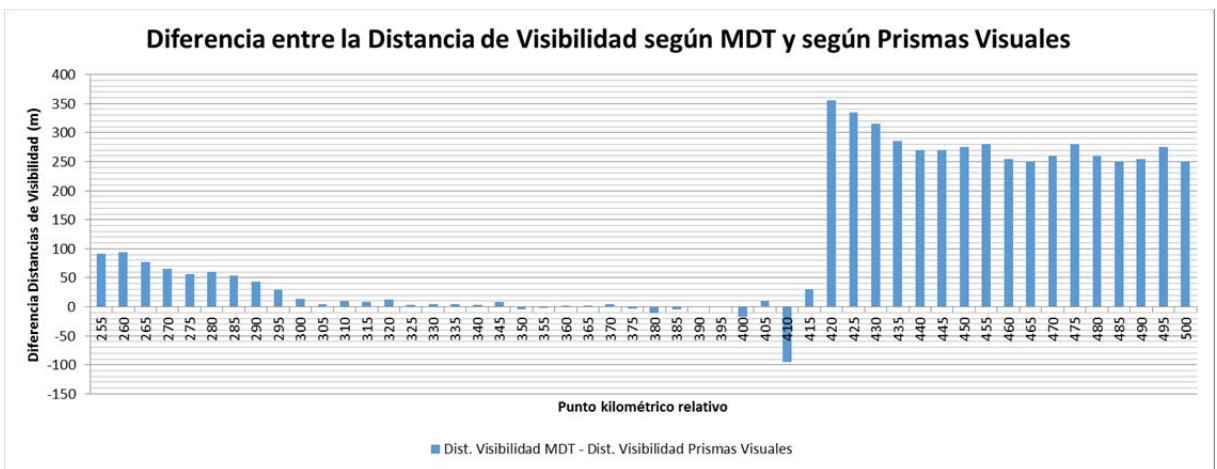
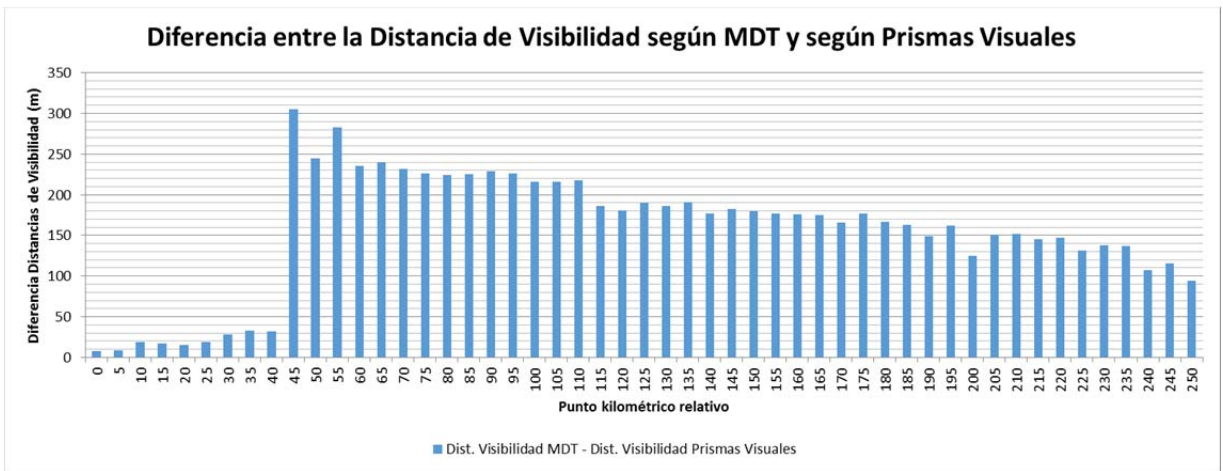
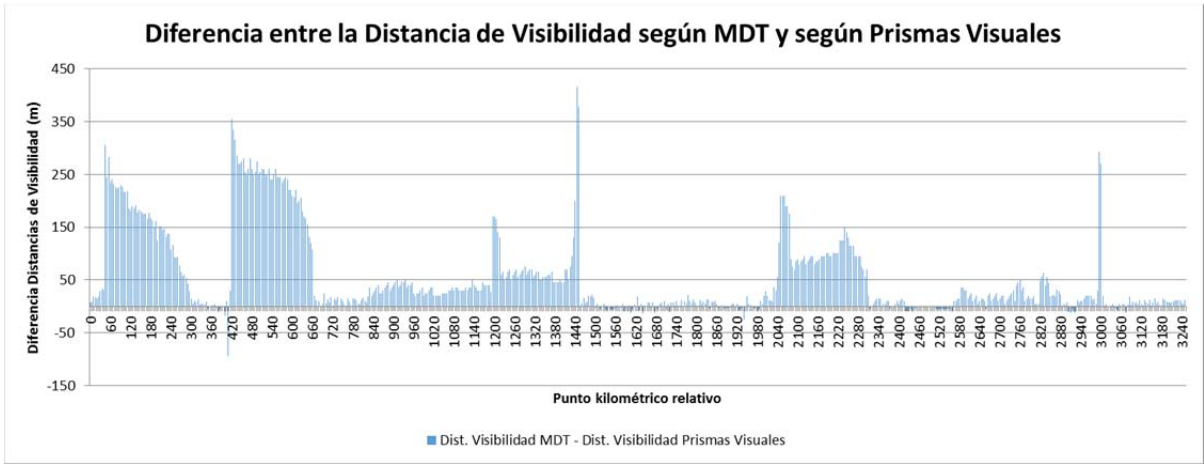


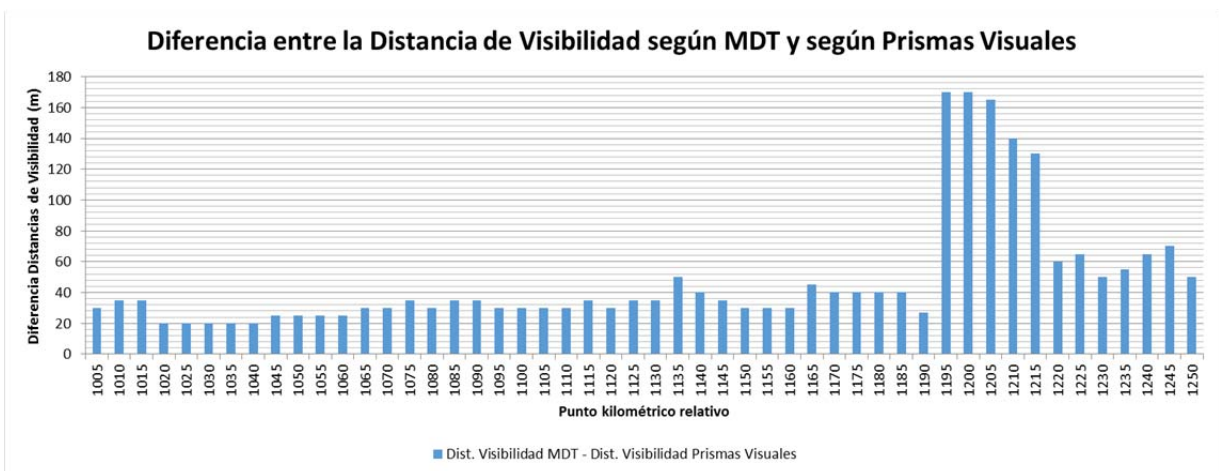
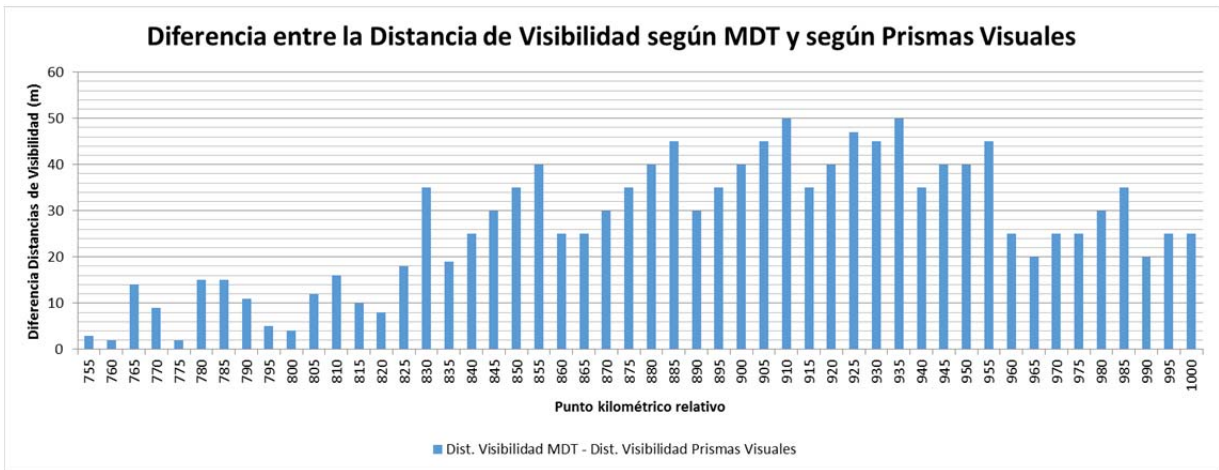
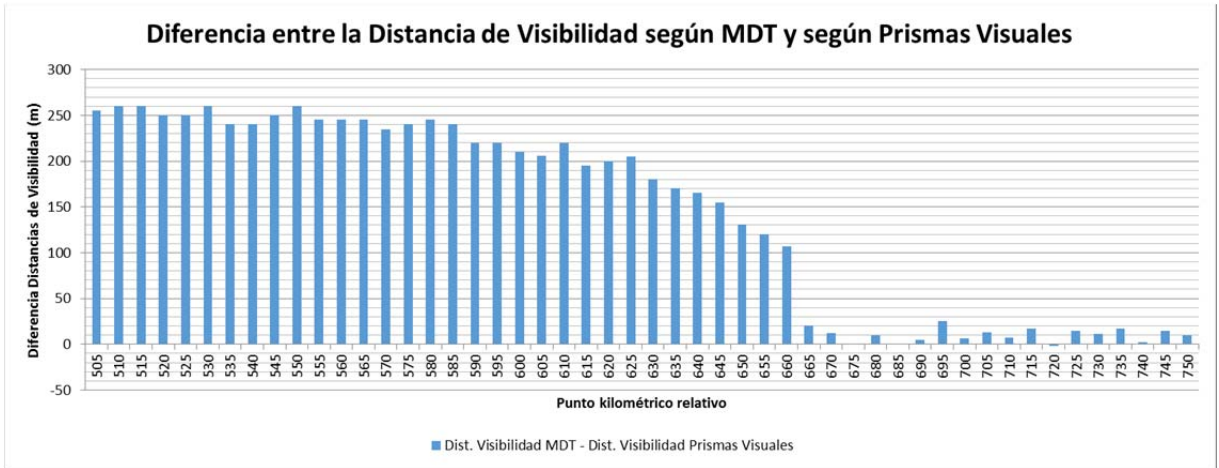


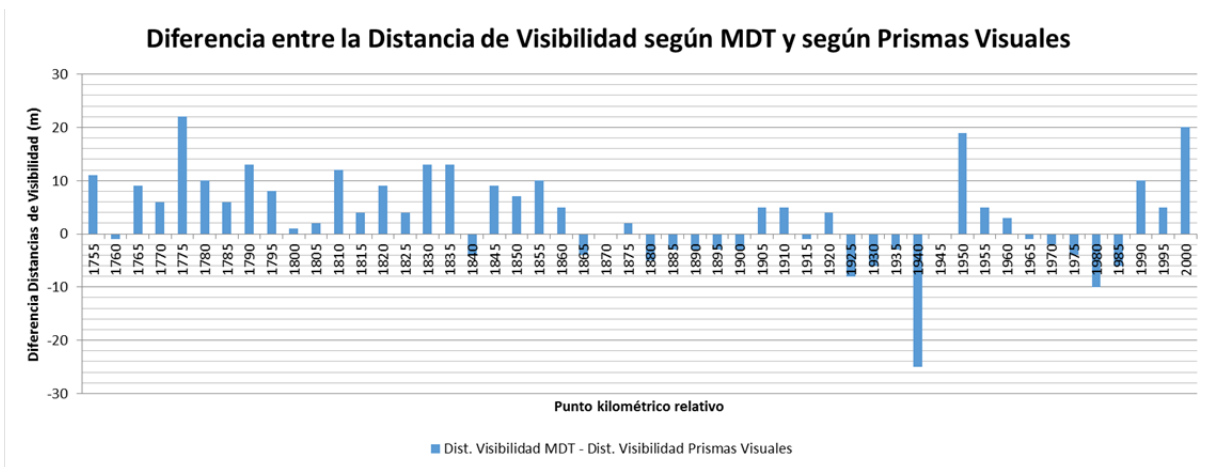
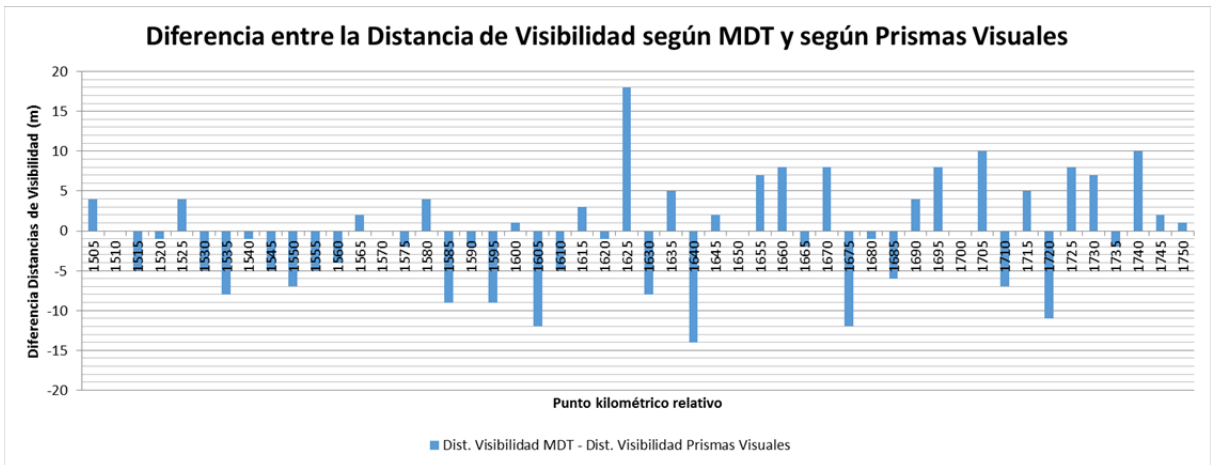
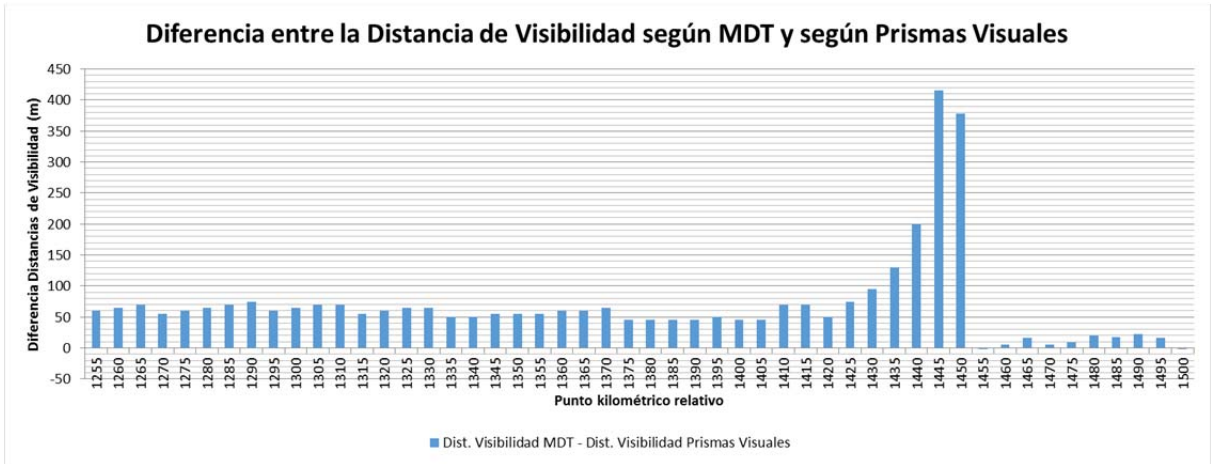


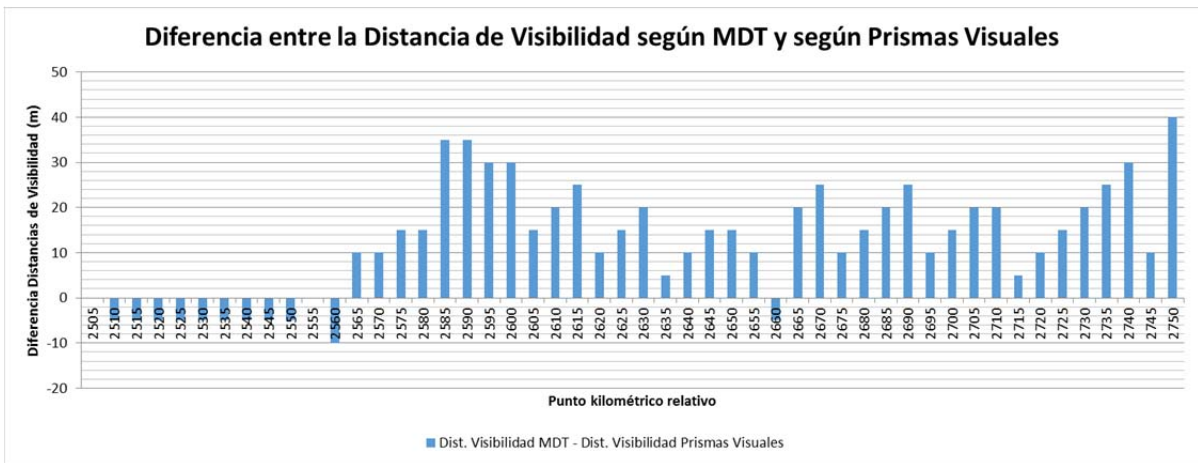
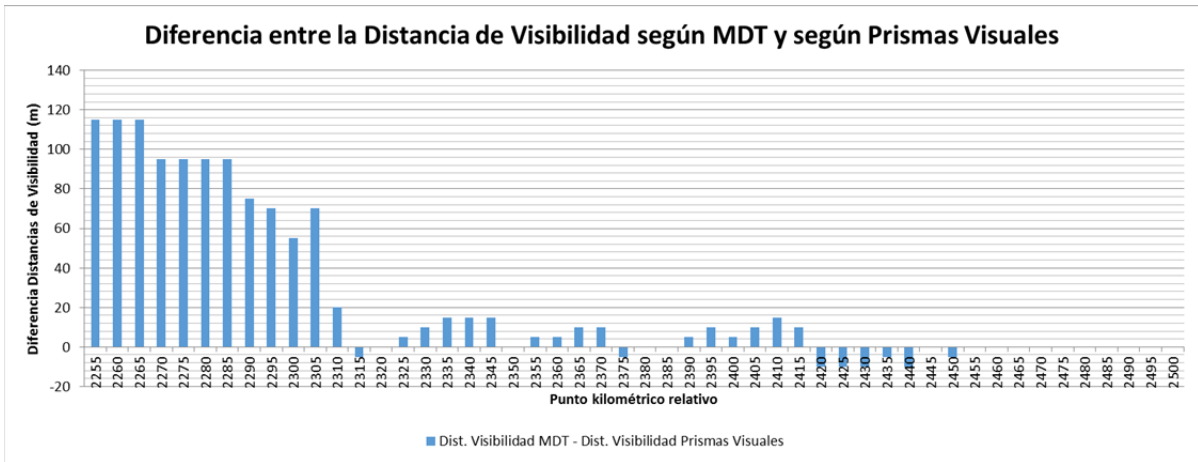
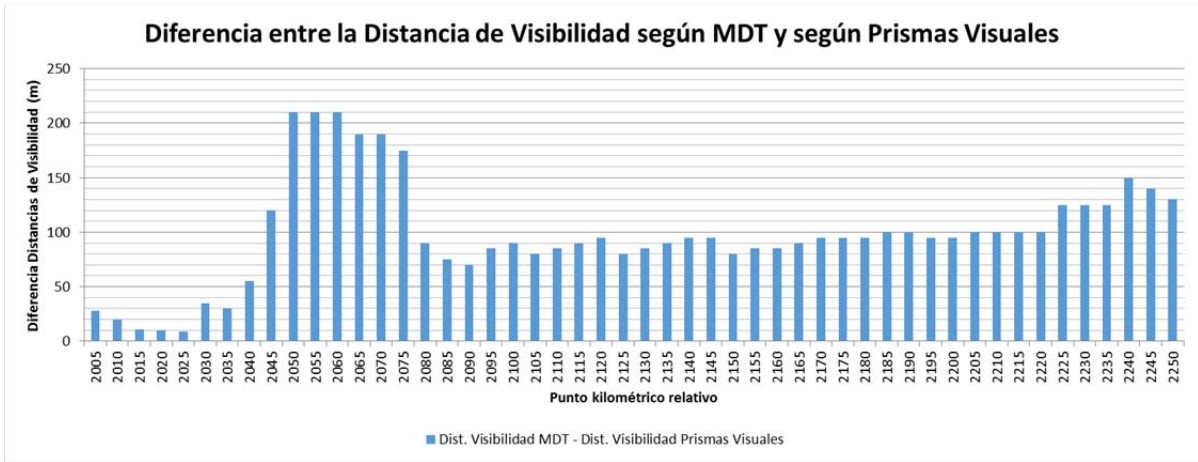


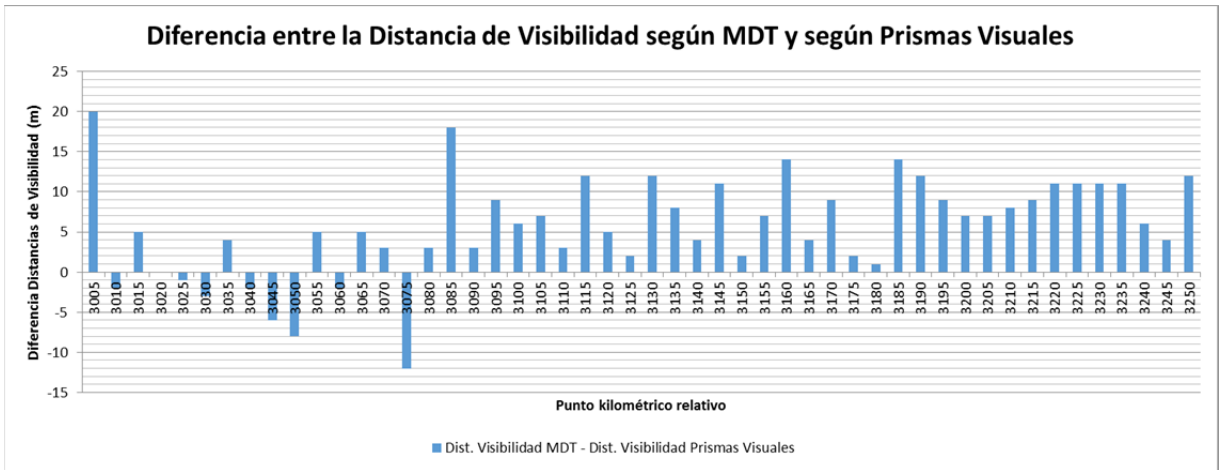
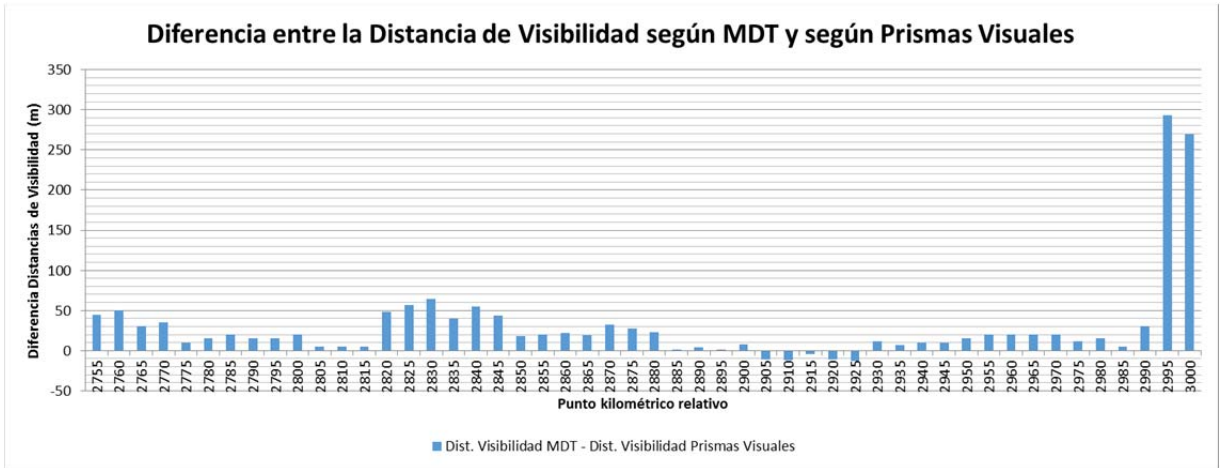
9.4 ANEXO 4: CARRETERA CV-35. DIFERENCIA ENTRE LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD OBTENIDA A PARTIR DE MDT Y A PARTIR DE PV



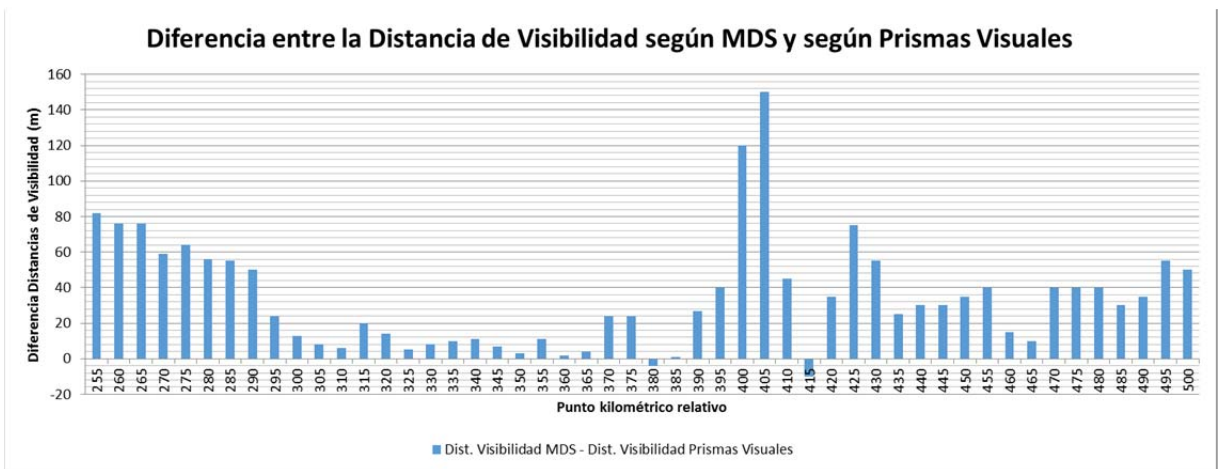
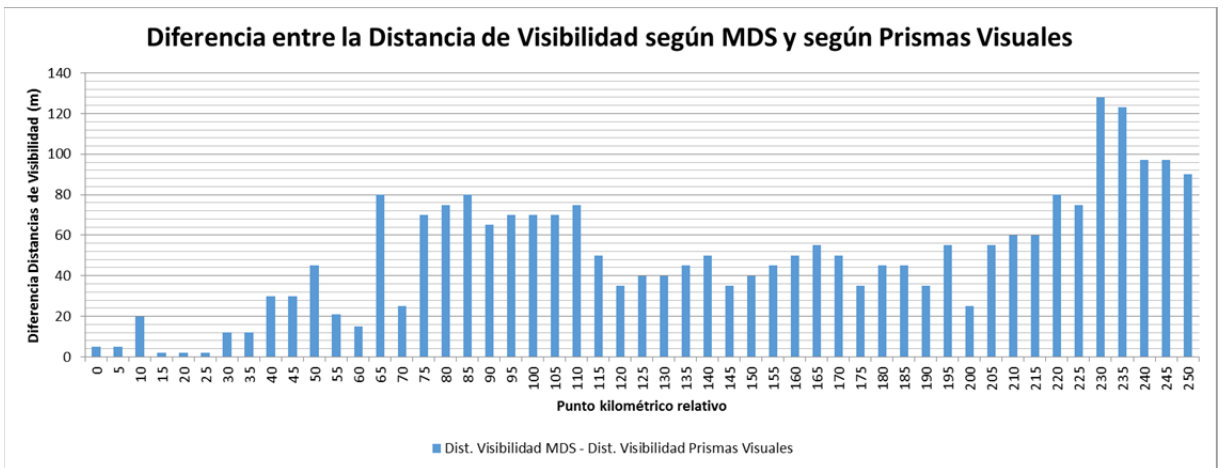
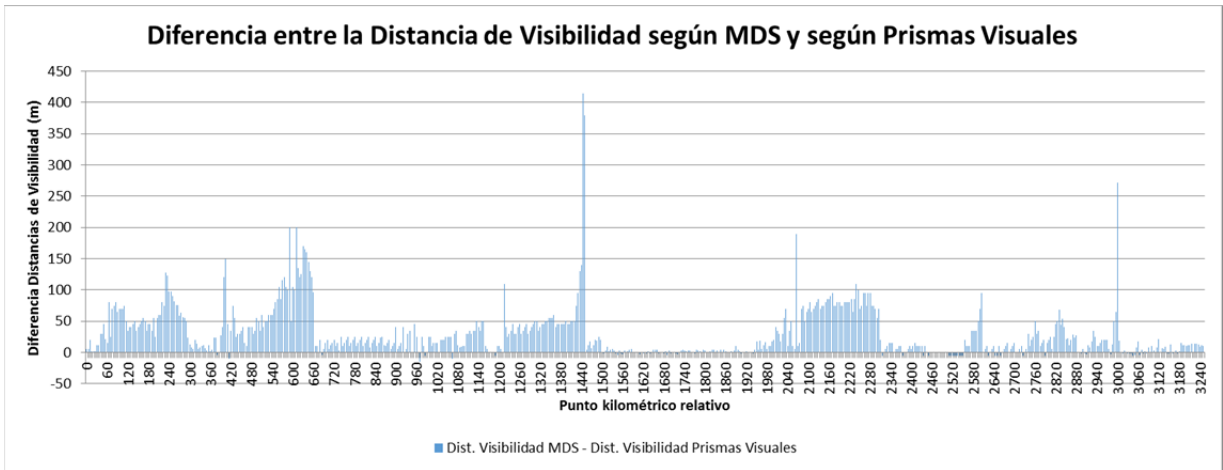


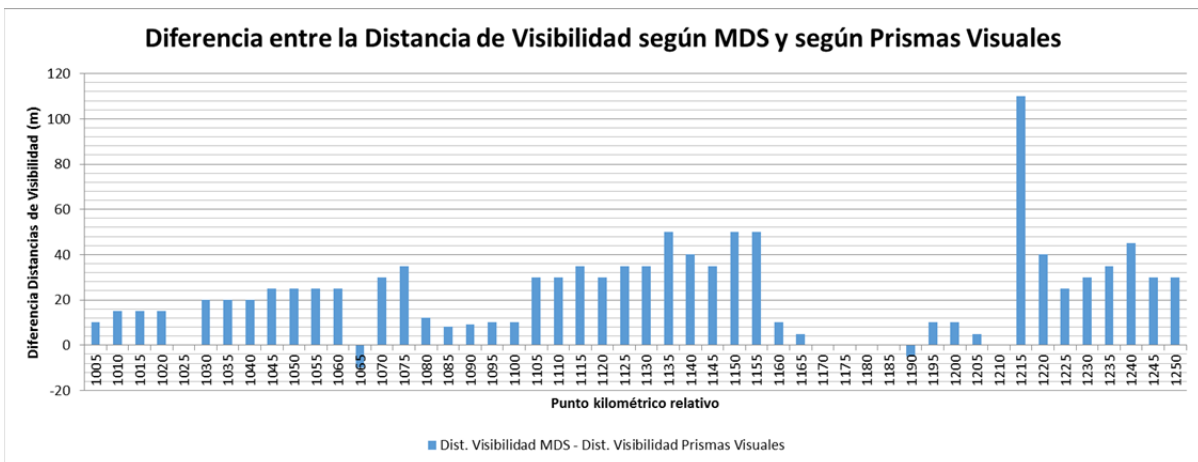
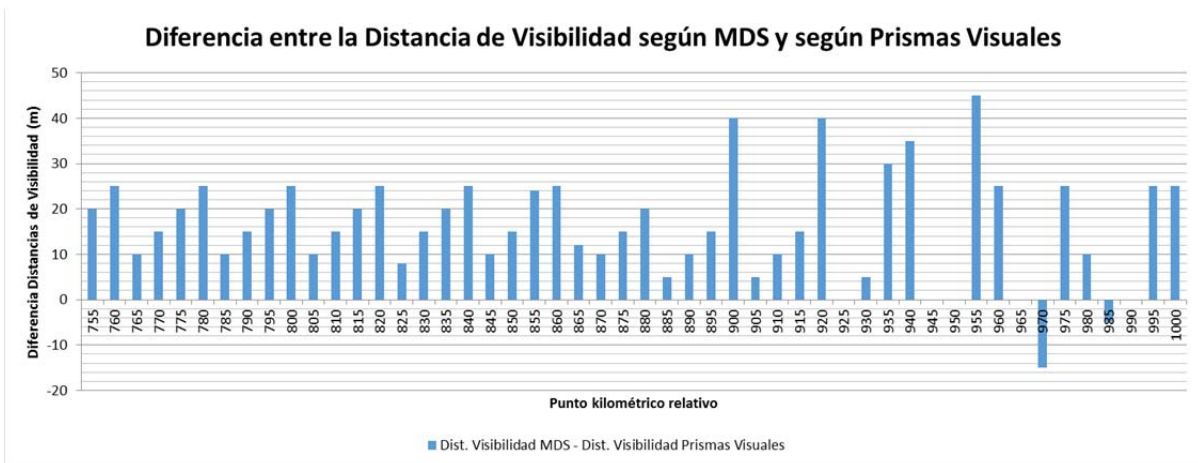
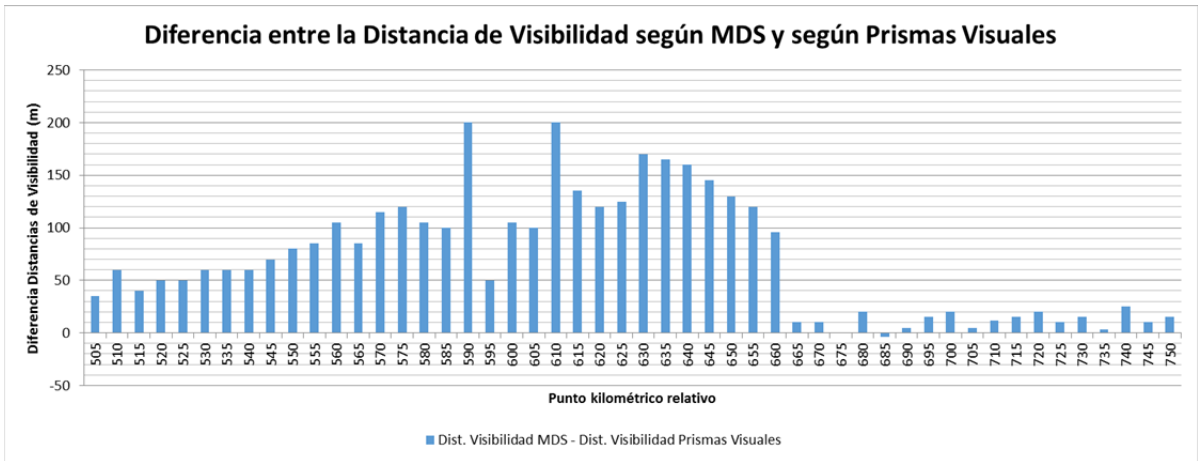


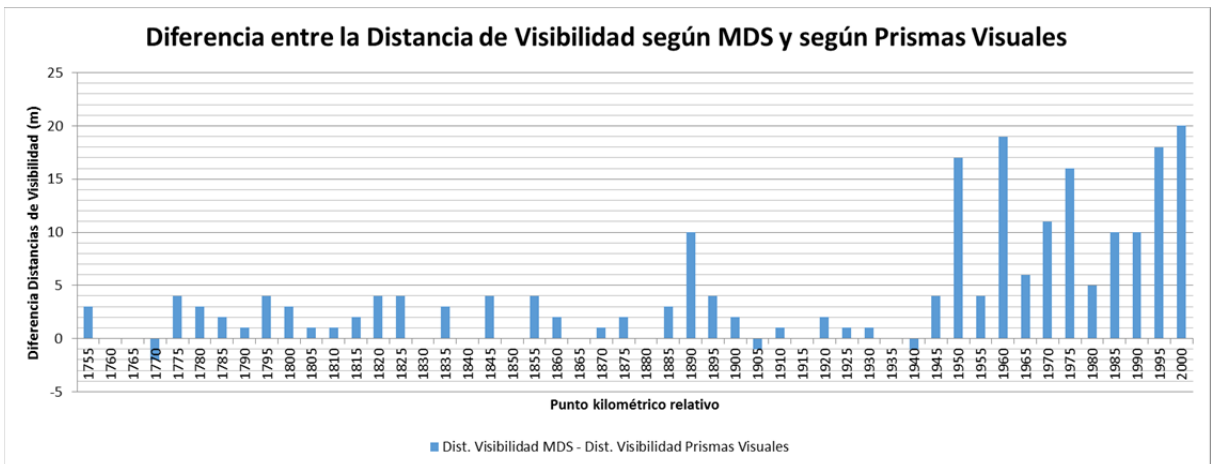
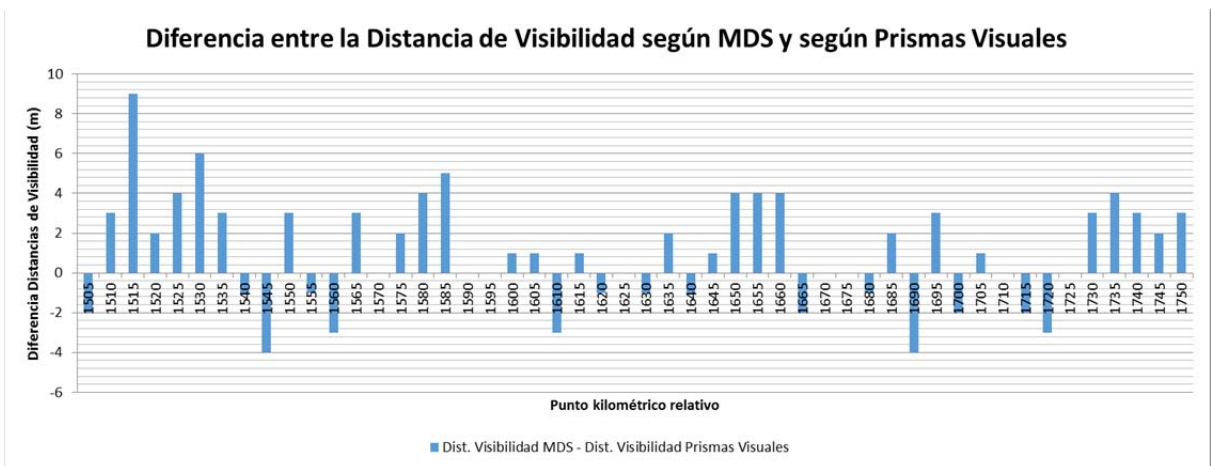
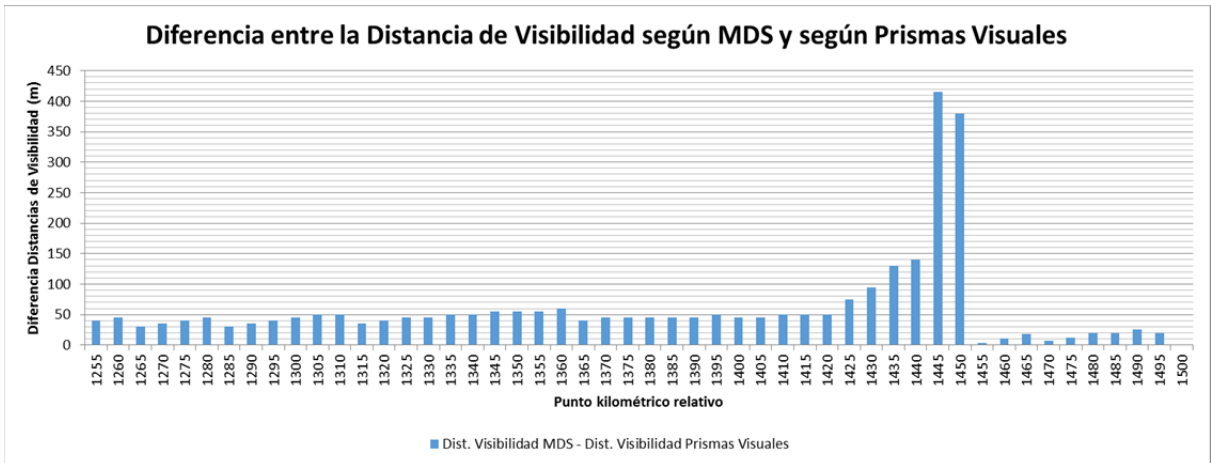


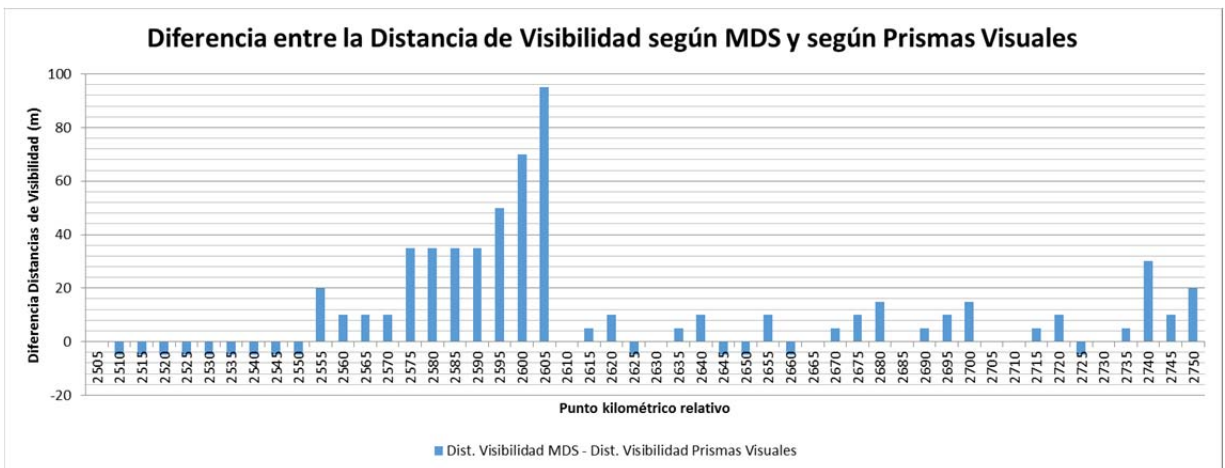
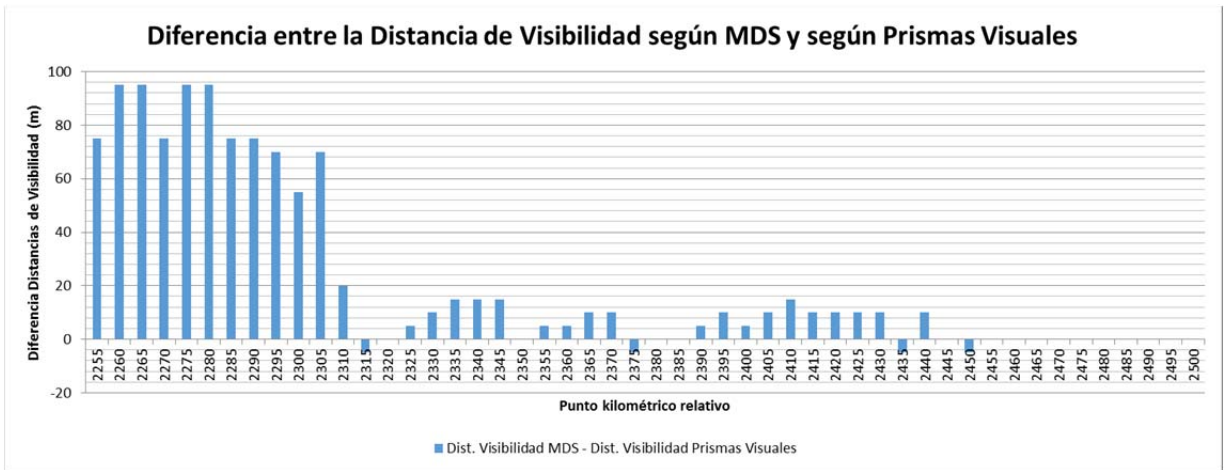
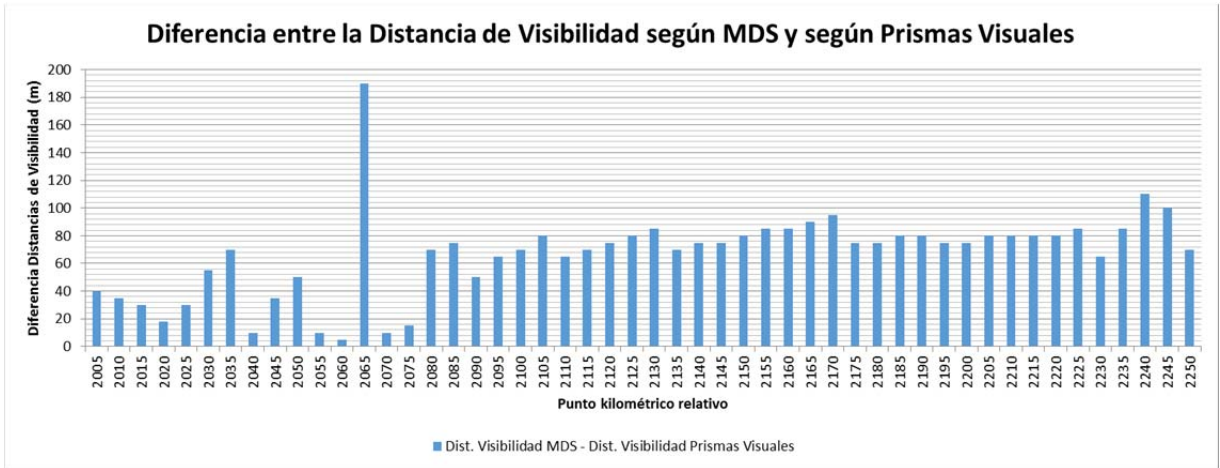


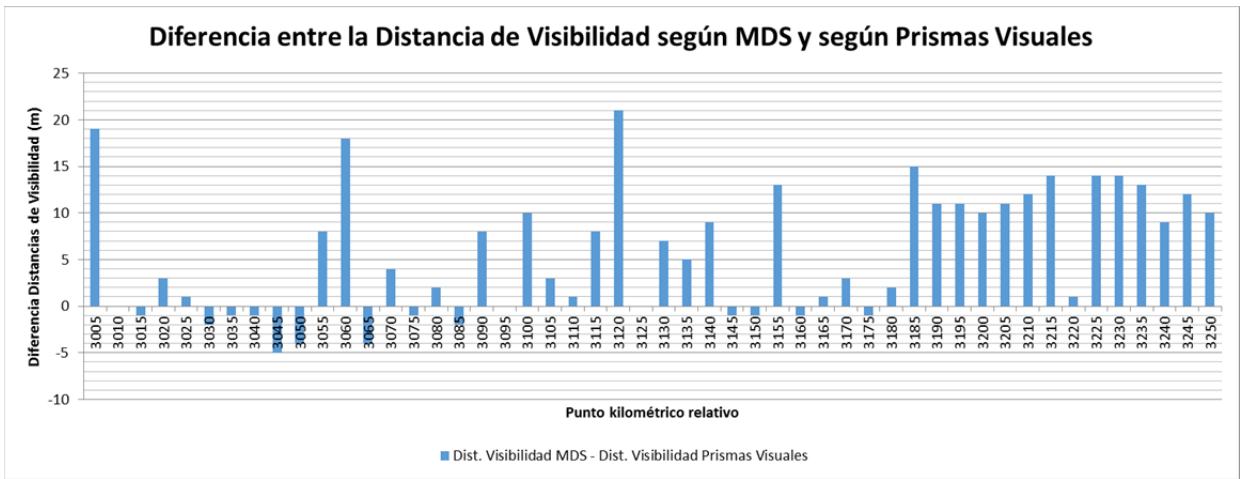
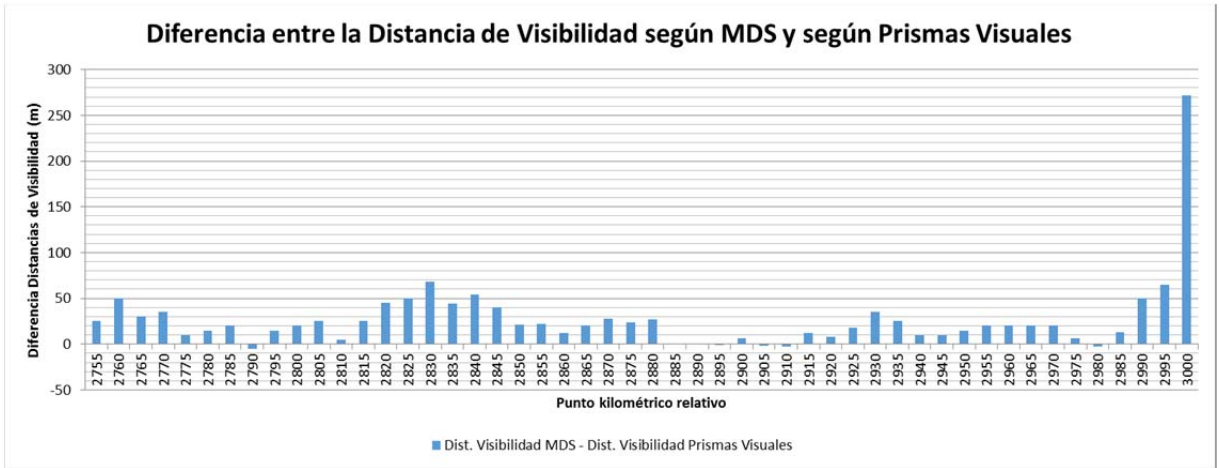
9.5 ANEXO 5: CARRETERA CV-35. DIFERENCIA ENTRE LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD OBTENIDA A PARTIR DE MDS Y A PARTIR DE PV



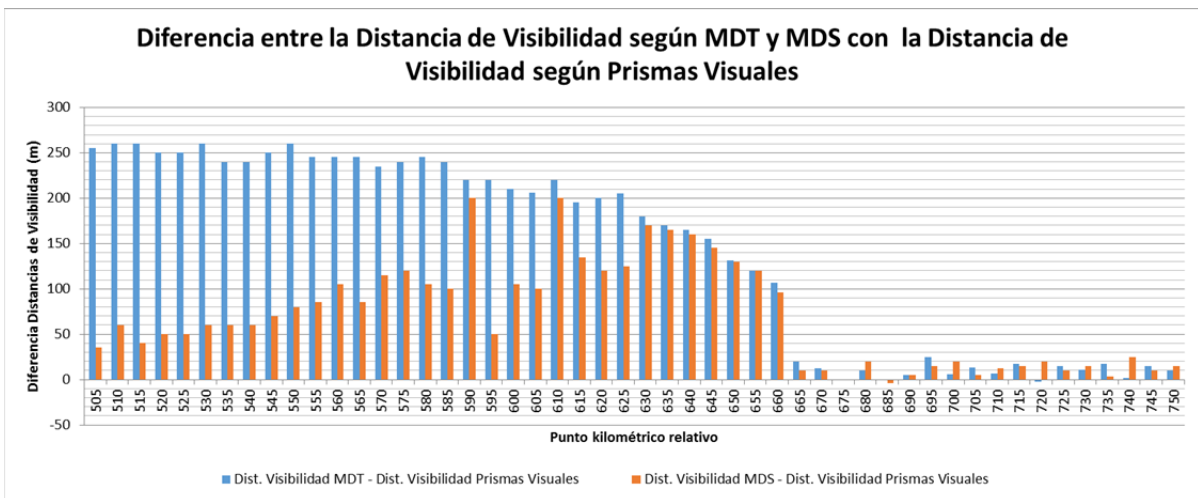
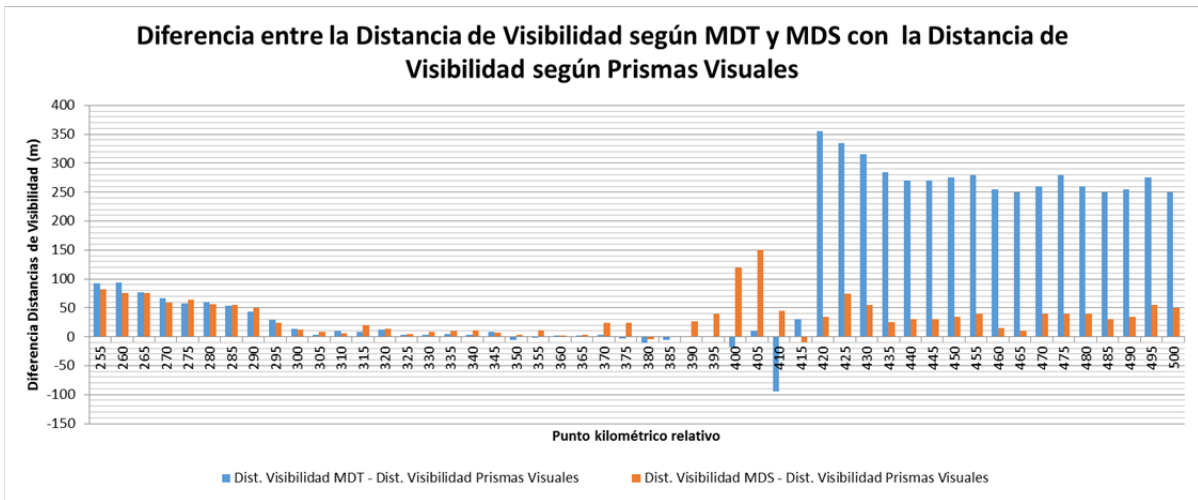
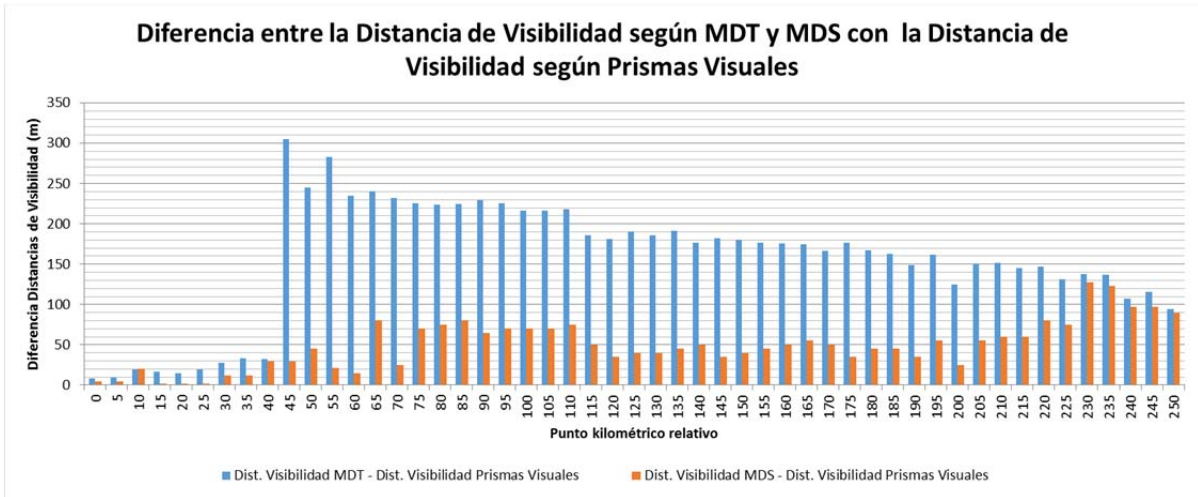


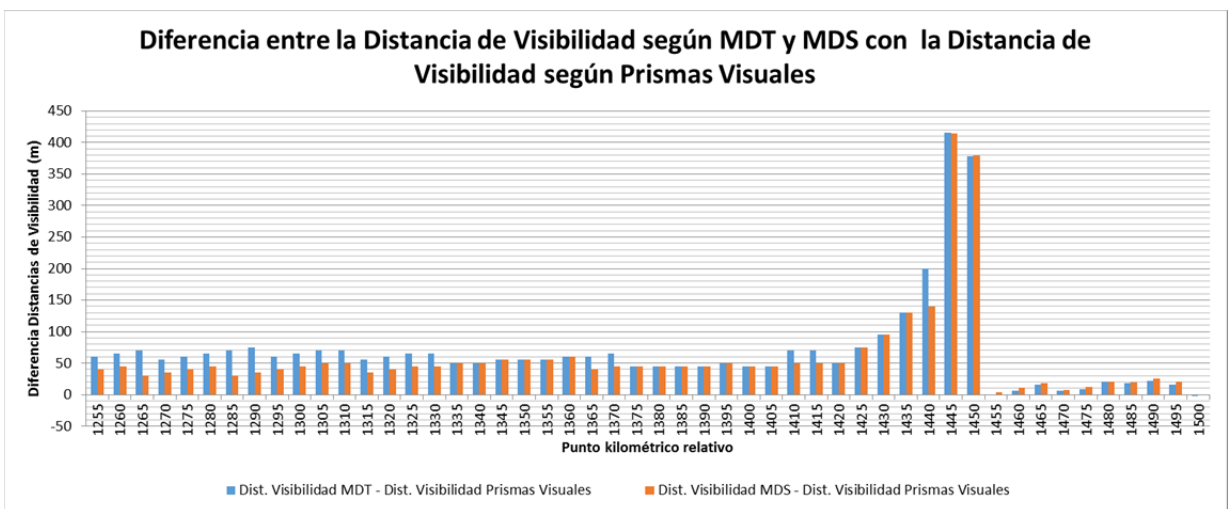
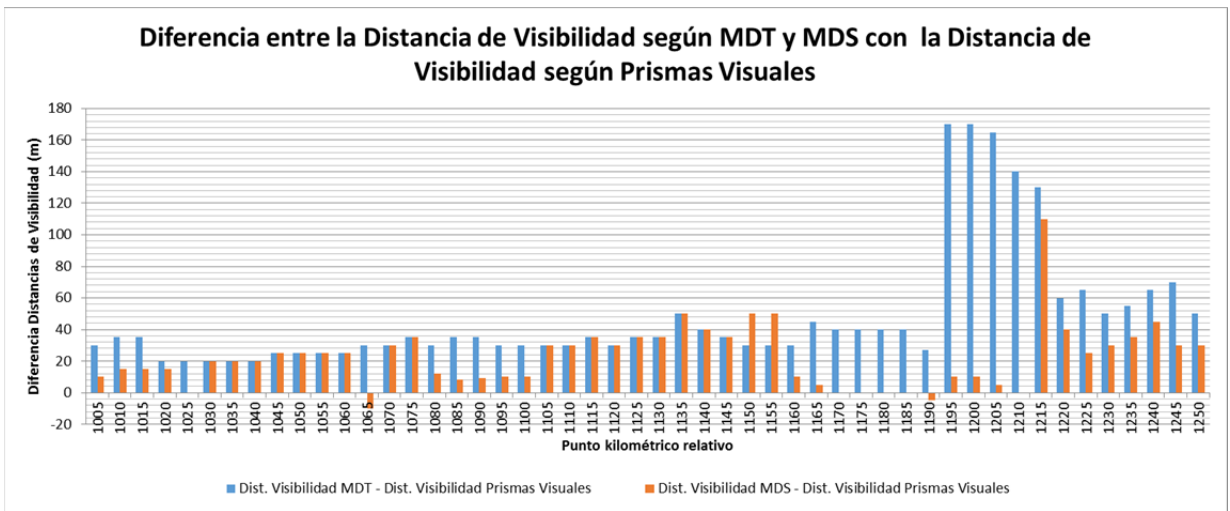
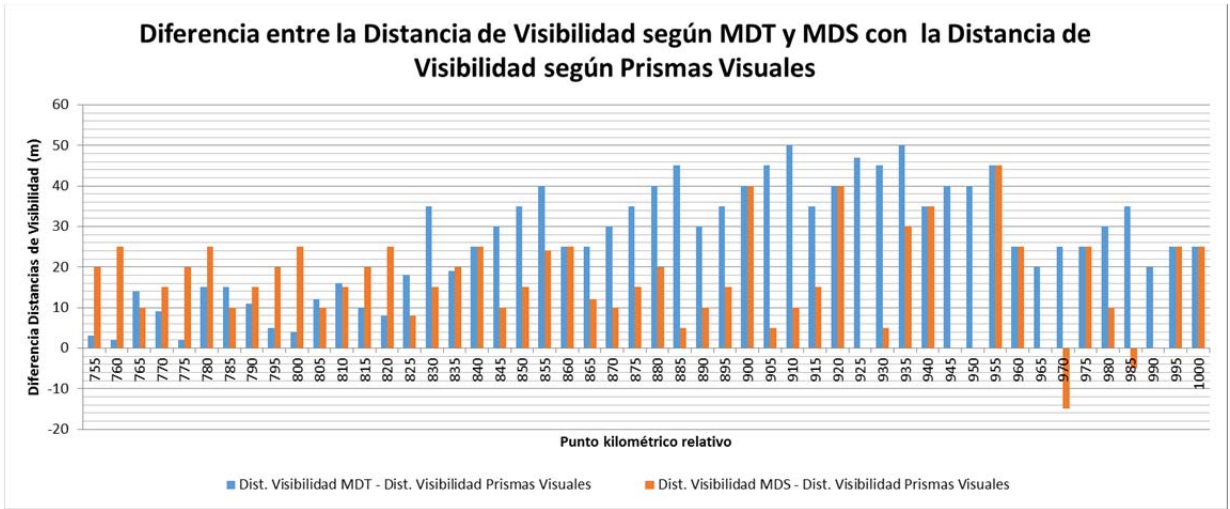


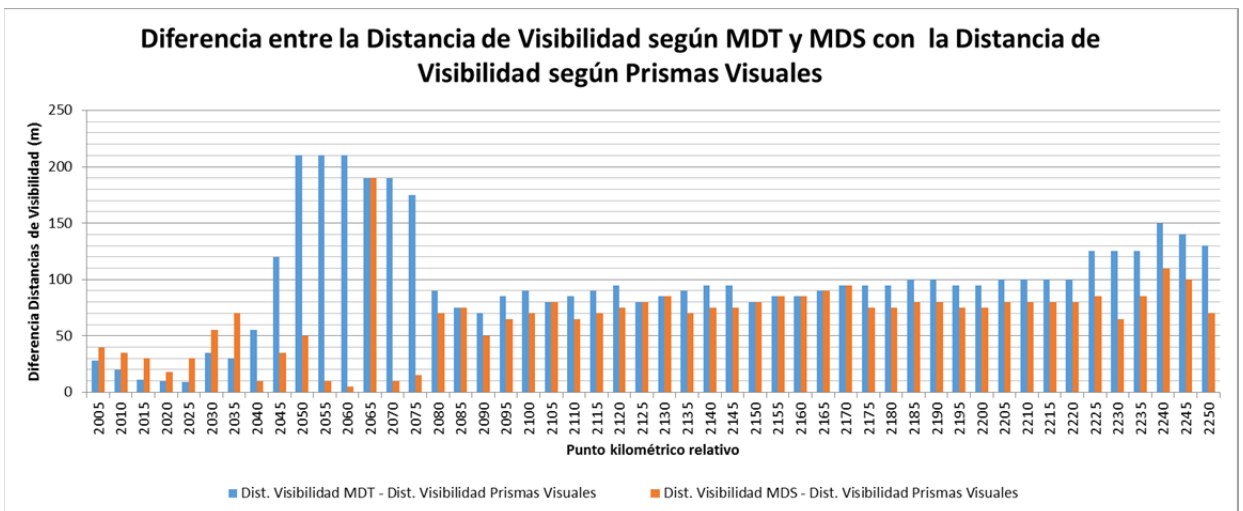
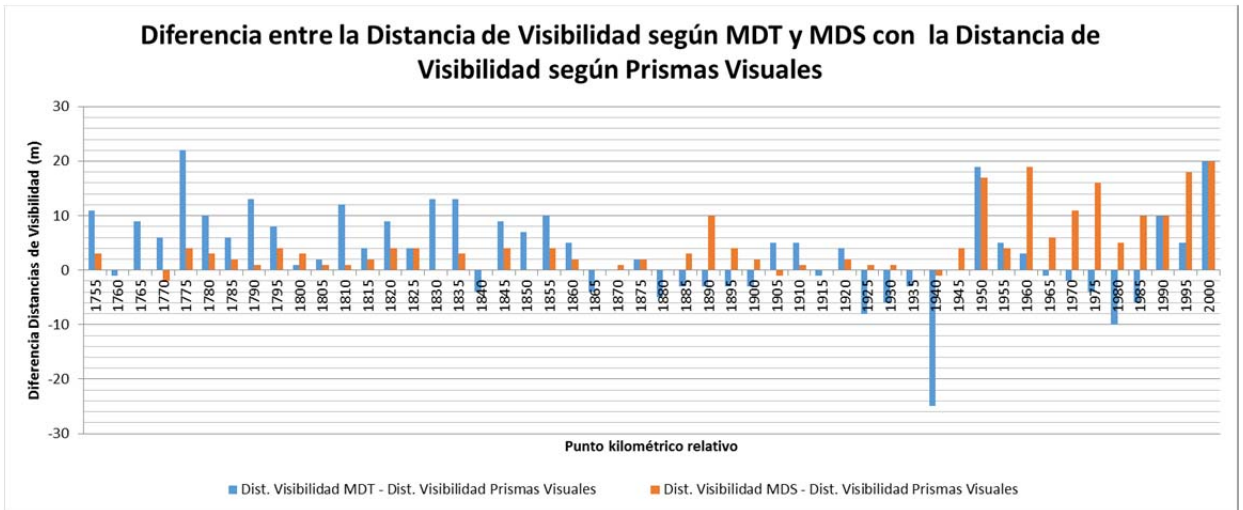
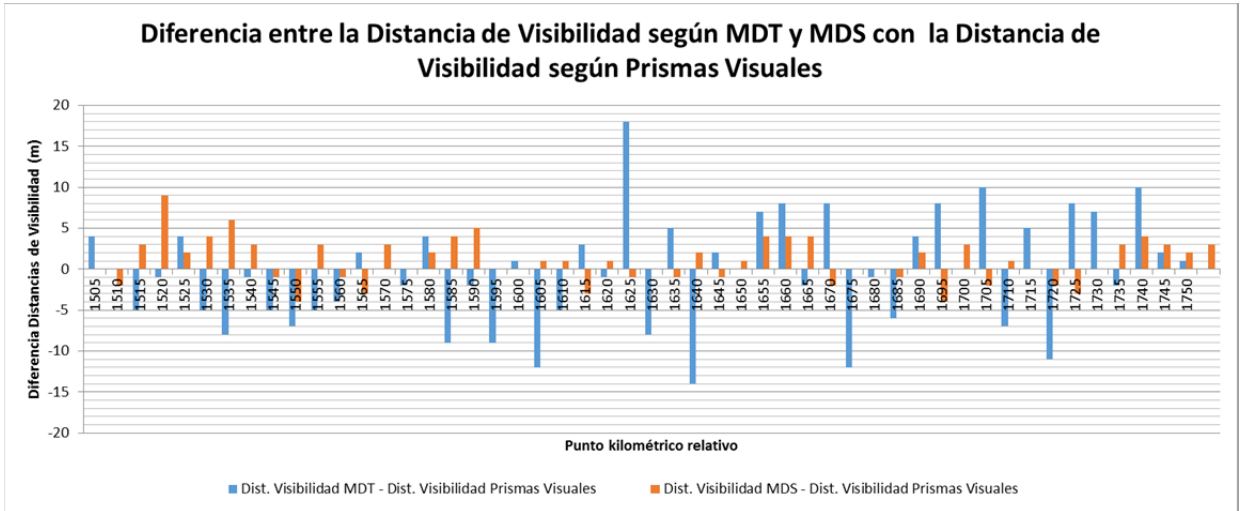


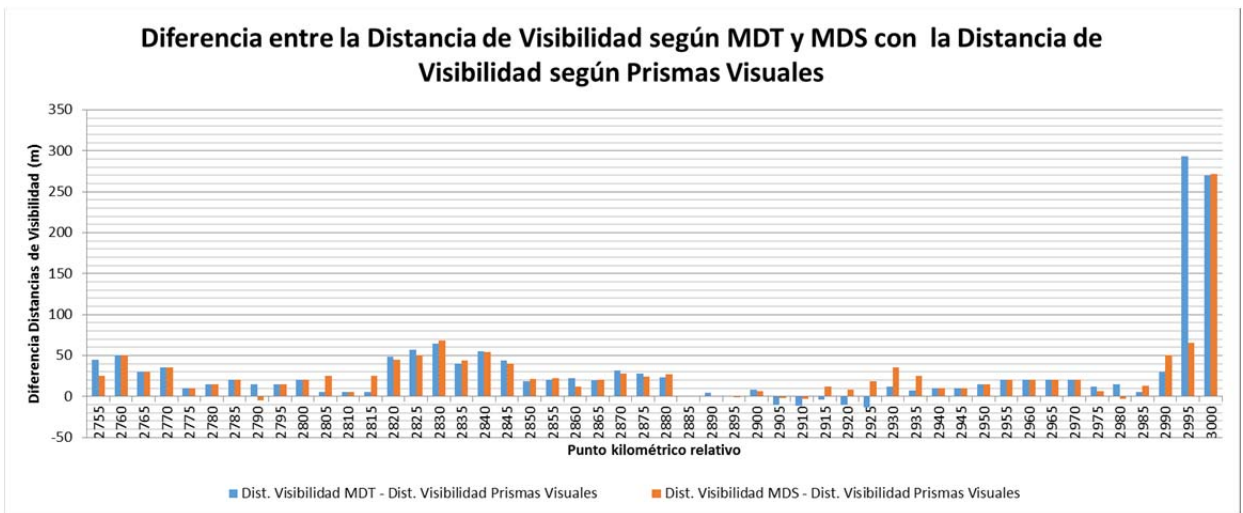
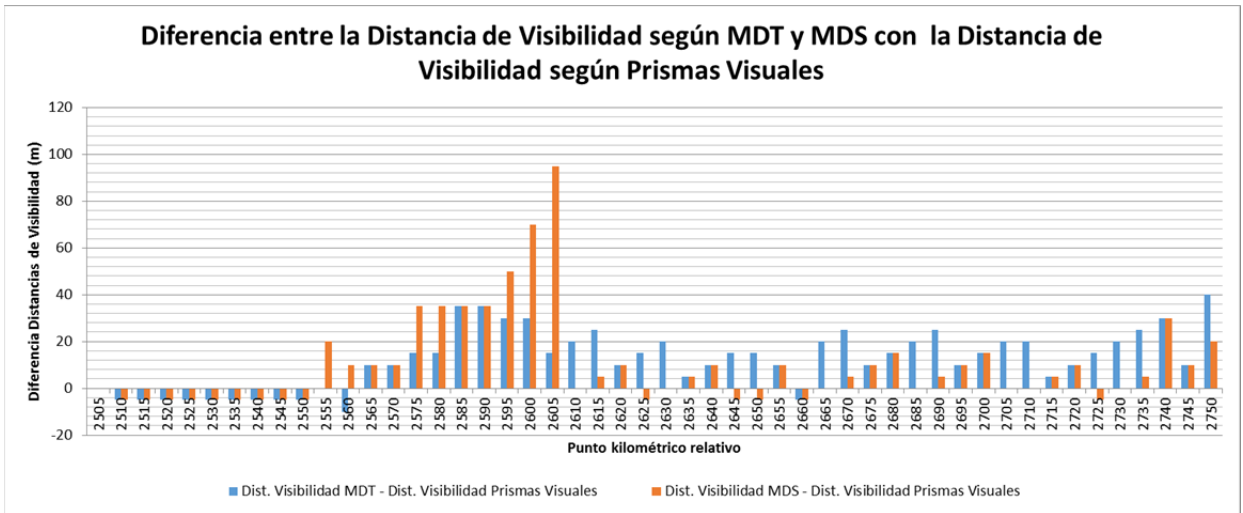
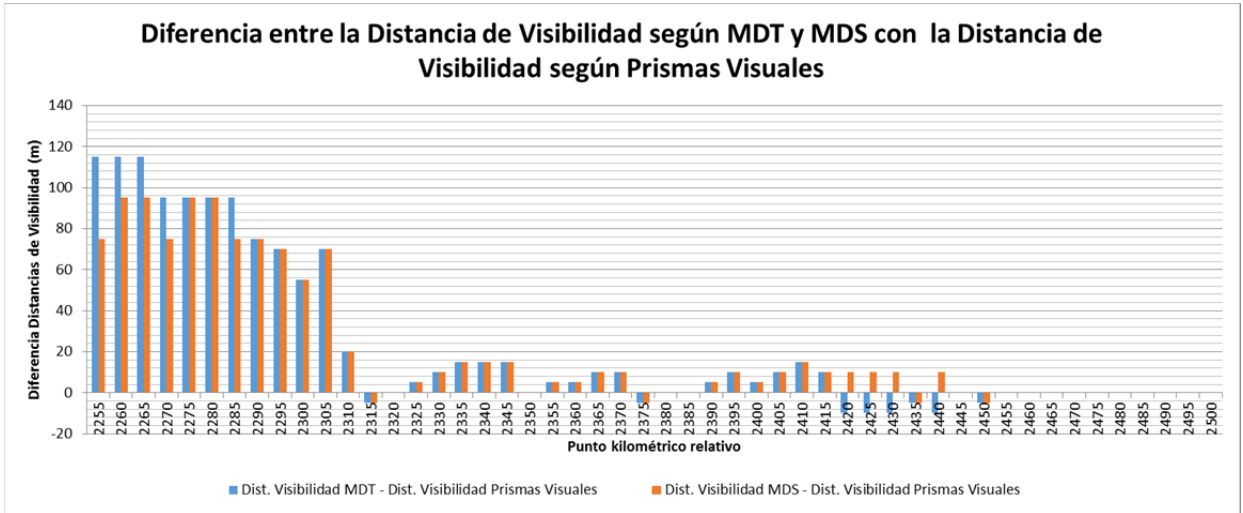


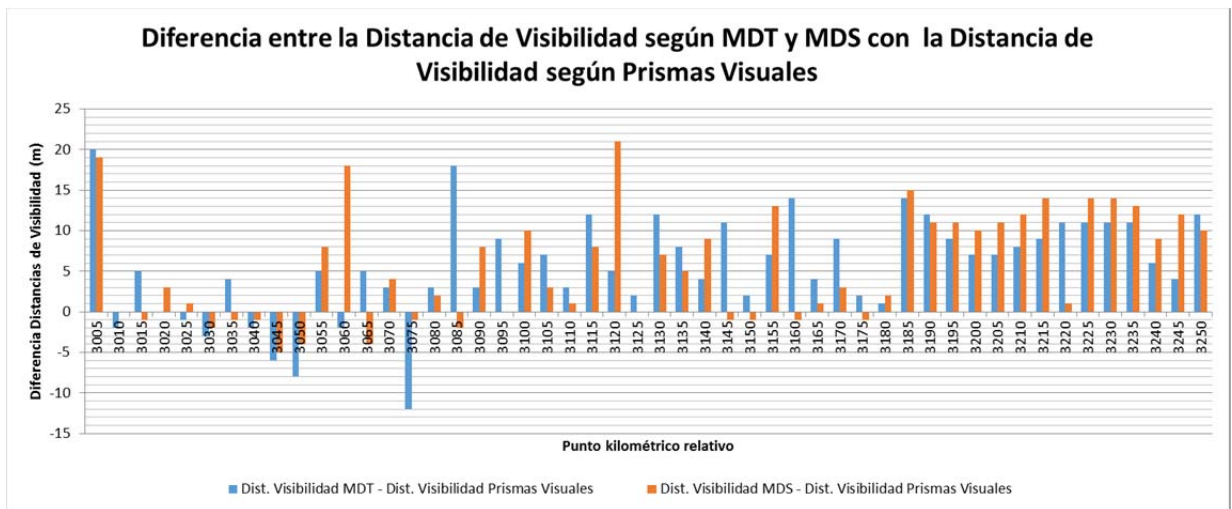
**9.6 ANEXO 6: CARRETERA CV-35. DIFERENCIAS ENTRE LA
DISTANCIA DE VISIBILIDAD OBTENIDA A PARTIR DE MDT Y MDS
CON LA OBTENIDA A PARTIR DE PV.**



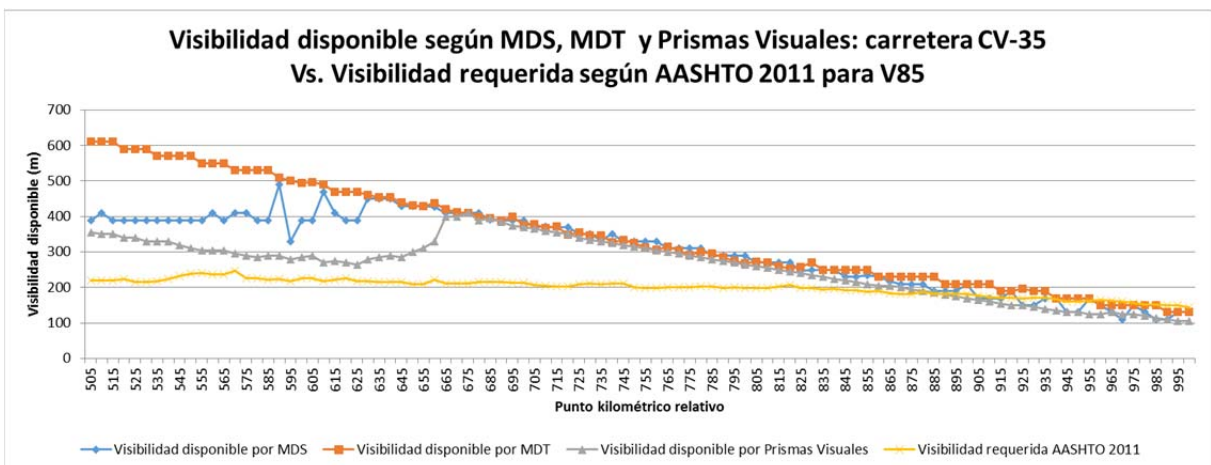
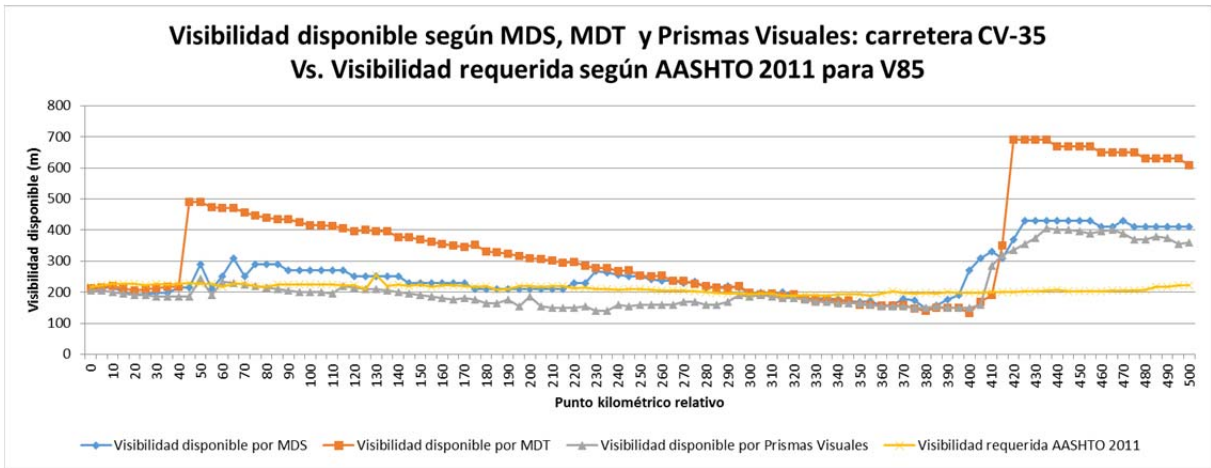
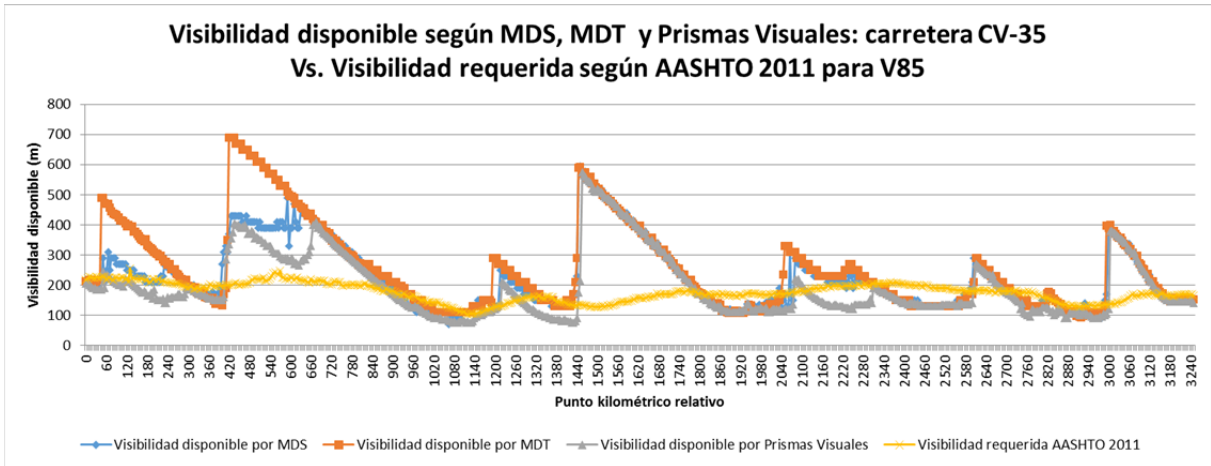


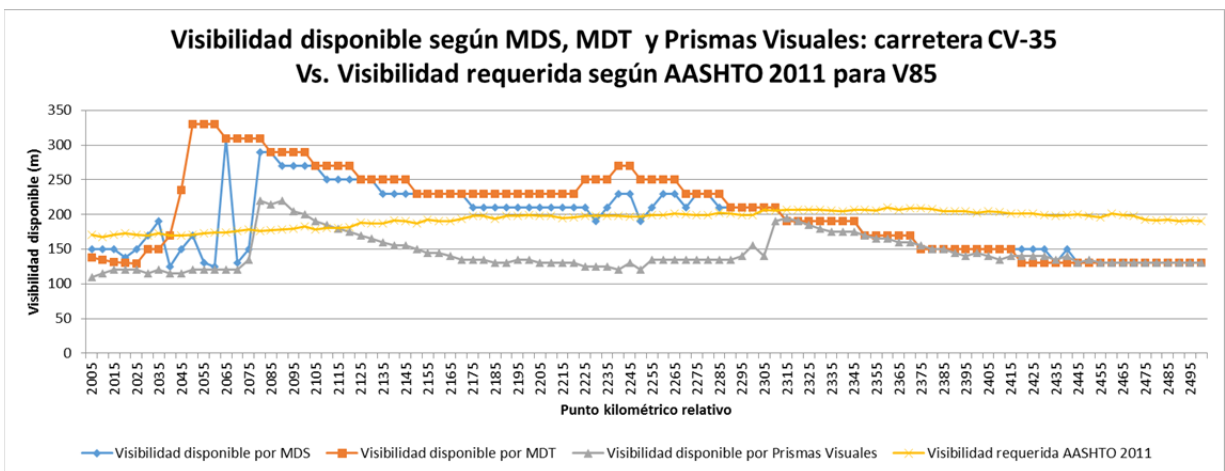
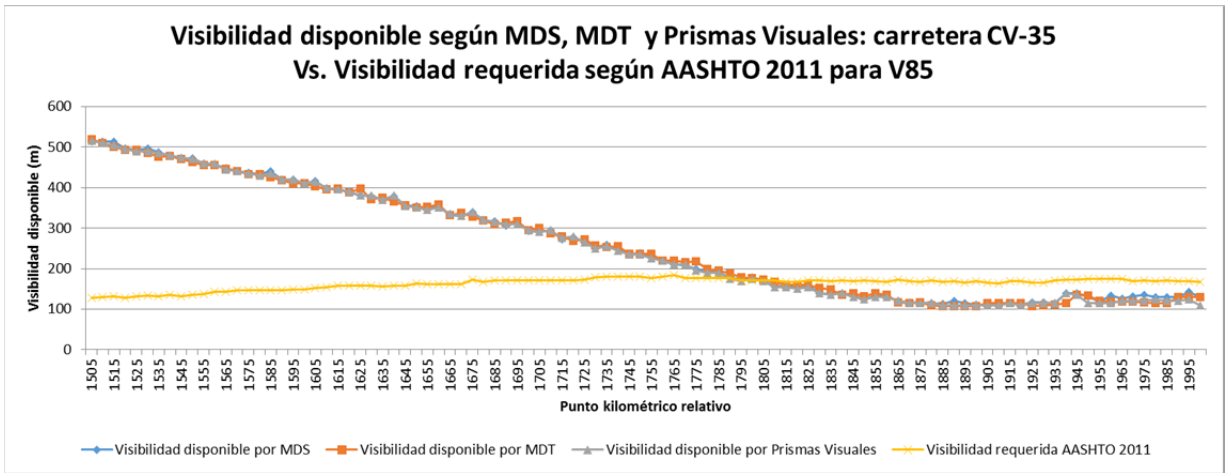
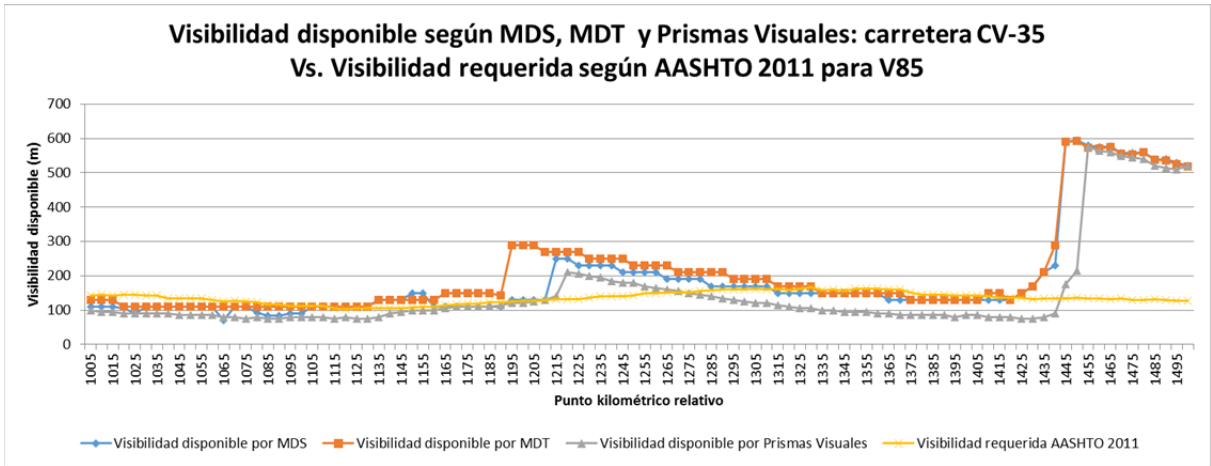


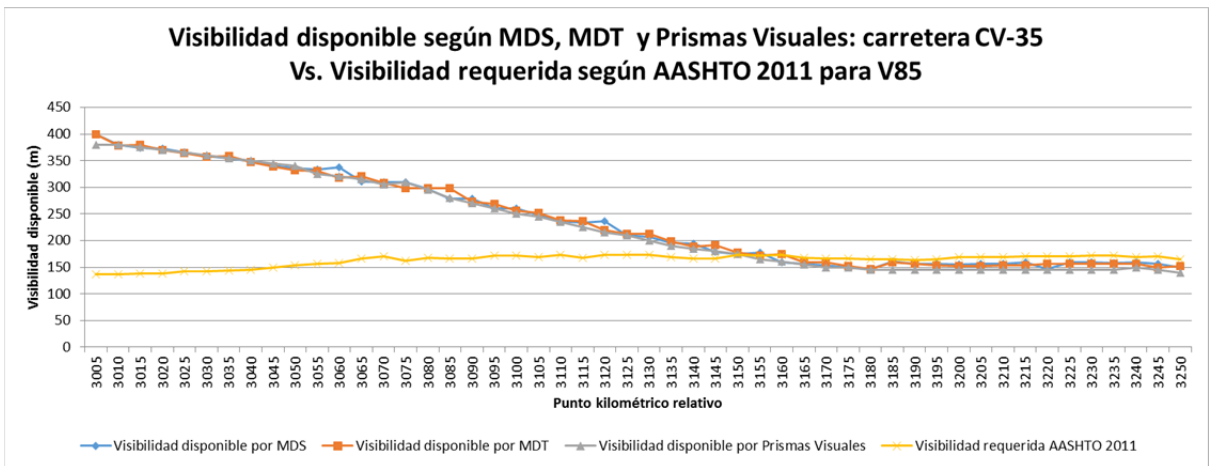
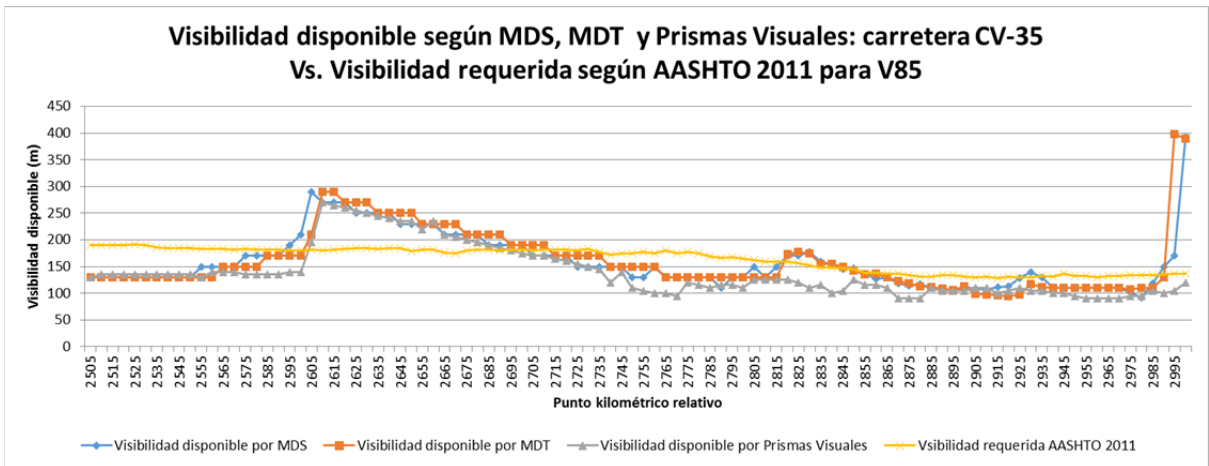




9.7 ANEXO 7: CARRETERA CV-35. VISIBILIDADES OBTENIDAS POR PV, MDT Y MDS, Y VISIBILIDAD REQUERIDA SEGÚN LA AASHTO 2011 PARA LA V_{85} ESTIMADA.







9.8 ANEXO 8: CARRETERA CV-35. VISIBILIDADES OBTENIDAS A PARTIR DE PERFILES DE PROYECTO Y A PARTIR DE PV.

