

Nueva Metodología para la Obtención de Visibilidades Disponibles en Carreteras a partir de Datos LiDAR Mobile



New Methodology for Determining Available Sight Distances on Highways by Using Mobile LiDAR Data

José M. Campoy-Ungría

*Profesor Asociado, Grupo de Investigación en Ing. de Carreteras
Universitat Politècnica de València*

Ana María Perez-Zuriaga

*Profesor Ayudante, Grupo de Investigación en Ing. de Carreteras
Universitat Politècnica de València*

Alfredo García

*Catedrático, Grupo de Investigación en Ing. de Carreteras
Universitat Politècnica de València*

Francisco Javier Camacho-Torregrosa

*Profesor Ayudante, Grupo de Investigación en Ing. de Carreteras
Universitat Politècnica de València*

Resumen

Las distancias de visibilidad requeridas para maniobras de parada, adelantamiento o cruce constituyen un parámetro esencial en el diseño geométrico de nuevas carreteras; sin embargo, su medición y comprobación en carreteras existentes, es una complicada y costosa labor rara vez acometida. La rápida evolución de las tecnologías de captura de información del entorno mediante nubes de puntos LiDAR Mobile, abre un enorme potencial en la evaluación sistemática de las distancias de visibilidad realmente disponibles. Las nubes de puntos LiDAR Mobile permiten considerar tanto la plataforma de la carretera como también otros obstáculos que pueden impedir la visibilidad, tales como barreras, señales, muros o vegetación. En este artículo se describe una nueva metodología basada en los datos LiDAR Mobile originales que permite calcular las distancias de visibilidad sin recurrir a la generación de superficies. El sistema es aplicado a un tramo real de carretera donde se han representado en tres dimensiones tanto las visuales consideradas, como la nube de puntos original, demostrando que los algoritmos desarrollados permiten la identificación y detección precisa de obstáculos incluso de pequeñas dimensiones, pudiendo ser utilizados por los ingenieros en la evaluación y mejora de la seguridad vial.

PALABRAS CLAVES: LiDAR, distancia de visibilidad, seguridad vial.

Abstract

Sight distances are one of most important parameter on new highways geometric design for stopping, passing or crossing maneuvers; however, its measurement and verification on existing roads, is a difficult and expensive task rarely accomplished. Due the rapid development of new technologies based on massive capture environment information from mobile LiDAR data, a huge potential in systematic evaluation of sight distances, actually available, is open. Mobile LiDAR point clouds allow considering both the geometry of the road as well as other obstacles that can avoid visibility, such as barriers, signs, walls or vegetation. In this paper, a new methodology based on original mobile LiDAR data to evaluate sight distances, is presented. Building surfaces is not required. Application of the system to an existing road is described using three examples. The 3-D representation both the point cloud as visibility lines, shows that, the developed algorithms, allow an accurate location and identification of obstacles, including those of small dimensions. These new methodology can be used by practitioners in order to improve road safety.

KEY WORDS: LiDAR, sight distance, road safety.

1. Introducción

La capacidad del conductor de ver lo que se aproxima es uno de los elementos fundamentales para la operación segura y eficiente de un vehículo a lo largo de una carretera (AASHTO, 2011).

Un adecuado diseño geométrico debe garantizar una distancia de visibilidad suficiente para que los conductores puedan realizar maniobras tales como controlar sus vehículos ante la presencia de un objeto inesperado en la vía, ocupar el sentido contrario de circulación para adelantar a otros vehículos sin riesgo de accidente, o realizar maniobras de cruce o incorporación a la vía en condiciones seguras.

Para conseguir este objetivo, la distancia de visibilidad forma parte de las guías de diseño y condiciona una parte importante de los parámetros geométricos de las carreteras proyectadas; sin embargo, para la mayoría de las carreteras en servicio, la medida de la distancia de visibilidad realmente disponible en cada punto del trazado, es costosa, difícil y peligrosa. Además, la presencia de obstáculos que no forman parte de la plataforma de la carretera, tales como postes, barreras de seguridad, señales o vegetación, incrementan la dificultad sobre la obtención de la visibilidad realmente disponible.

LiDAR (Light Detection And Ranging) es una tecnología óptica de

teledetección que utiliza un haz láser pulsado para determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie mediante la recepción de la parte de radiación que es reflejada por dicho objeto. Su combinación con un sistema global de navegación por satélite (GNSS) y una unidad de medición inercial (IMU) permite determinar las coordenadas x, y, z de un sensor LiDAR en movimiento y a partir de ellas, calcular las coordenadas de los puntos de las superficies sobre los que se ha producido la reflexión del haz láser. El sistema puede instalarse en una plataforma en movimiento como puede ser un avión (LiDAR aéreo) o un vehículo automóvil (LiDAR mobile).

Las precisiones obtenidas por los sistemas Lidar mobile han sido analizadas en numerosos estudios, obteniéndose errores absolutos centimétricos en la posición planimétrica y altimétrica de los puntos (Barber et al., 2008; Ussyshkin et al., 2008).

Por otro lado, las altas frecuencias de funcionamiento de los actuales equipos LiDAR Mobile, que habitualmente combinan varios escáneres láser, proporcionan la posición de miles de puntos por segundo, lo que permite obtener altas densidades de datos.

En los últimos años se ha venido produciendo un notable incremento de la potencia y frecuencia de los escáneres con costes cada vez

menores, lo que permite obtener densas nubes de puntos, y una fiel reproducción del entorno real de la carretera incluso para velocidades de circulación similares a las del resto del tráfico (Figura1).

Cuando se usa en carreteras, este sistema de captura de información topográfica y de la infraestructura presenta ventajas en la velocidad de adquisición, en la interferencia con el tráfico, en la seguridad de la toma de datos y en sus costes asociados respecto a tomas de datos por técnicas topográficas tradicionales (Glennie, 2009).

En este artículo, se dan a conocer las fundamentos y posibilidades del uso de este tipo de tecnologías en la evaluación de la visibilidad realmente disponible y por tanto, también de su potencial de uso en estudios y auditorías de seguridad vial.

El objetivo de la primera fase de la investigación ha sido desarrollar mediante programación, un sistema automatizado de cálculo de distancias de visibilidad en carreteras basado en las tecnologías LiDAR Mobile. El sistema desarrollado proporciona una velocidad de proceso y una precisión de resultados que la hace especialmente útil para su uso en el trabajo diario de los ingenieros de carreteras.

Basándose en los avances de la investigación, la metodología de obtención de visuales en tres dimensiones ha sido implementada

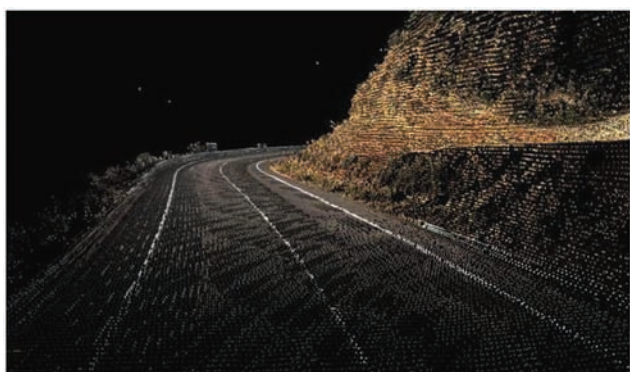


Figura 1. Nube de puntos Lidar e imagen obtenida con un equipo IPS2 de Topcon.

en un visor tridimensional especialmente desarrollado para este fin de las marcas Inproaudit® y Dielmo 3D®.

La primera parte de este artículo describe los principales modelos de cálculo de visibilidades y la investigación previa relativa al uso de las nubes de puntos obtenidas con las técnicas LiDAR en la determinación de las distancias de visibilidad. La segunda parte describe la base conceptual de los algoritmos de cálculo desarrollados. Finalmente, para contrastar la coherencia de los resultados aportados por el sistema, se ha procedido a la toma de datos LiDAR de un tramo existente de carretera convencional, donde tanto las visuales obtenidas, como la nube de puntos obtenida, han sido representadas en tres dimensiones, comprobando que la pérdida de la visión detectada en el proceso se corresponde con la presencia efectiva de obstáculos en la nube de puntos LiDAR.

2. Antecedentes

Existen numerosos modelos tridimensionales desarrollados para abordar el cálculo de la distancia de visibilidad a partir de la geometría de la carretera.

Hassan et al. (1996) desarrolló un modelo de elementos finitos que reproducía la carretera mediante elementos triangulares de tres nodos y rectangulares de hasta ocho nodos. El cálculo de la distancia de visibilidad se llevaba a cabo mediante un proceso iterativo en el que se comprobaba si la visual lanzada desde un observador hacia un objeto, interceptaba alguno de los elementos de la red.

Romero et al. (2004) propusieron otro modelo de elementos finitos que calculaba la visibilidad del trazado con una sistemática parecida a la de Hassan. El programa desarrollado calculaba la geometría de la vía aplicando la normativa

española, obteniendo las coordenadas de los puntos singulares del eje y los intermedios para luego evaluar los de la sección. La distancia de visibilidad desde un punto se comprobaba lanzando visuales desde la posición del observador a todas las posibles ubicaciones de objeto hasta que una posición dejaba de ser visible.

Yan et al. (2008) también utilizaron un modelo de elementos finitos pero abordando además el reto de calcular distancias de visibilidad cuando los objetos son móviles, como ocurre en las distancias de visibilidad de adelantamiento. Los vehículos que suponían un obstáculo se modelizaron como elementos rectangulares de modo que pudieran ser introducidos en la red de elementos finitos.

Ismail (2007) presentó un modelo analítico basado en la representación paramétrica de la vía y de los elementos de la sección transversal. A diferencia de los anteriores, el modelo parametrizaba todas las secciones de la vía respecto al eje de la calzada. La obstrucción era solventada como un problema de optimización, en el que se minimizaba la diferencia de cotas entre la altura de la visual y la de la curva parametrizada.

El cálculo de la distancia de visibilidad que requiere el conductor se ha llevado a cabo también mediante simulaciones; así, Easa (2006) recreó la visibilidad tridimensional mediante unas gafas que reproducían las imágenes tridimensionales proporcionadas por un ordenador.

Por su parte, el desarrollo de los modelos de diseño asistido por ordenador (CAD) ha constituido un avance importante en el diseño del trazado de carreteras. Las representaciones tridimensionales permiten evaluar la estética y la integración en el entorno, elementos difícilmente accesibles en la concepción bidimensional tradicional.

Actualmente existen numerosas herramientas informáticas, muchas de ellas integradas en el propio software de diseño de carreteras, que permiten reproducir la carretera en tres dimensiones y, en su mayoría, incluyen además un módulo de cálculo de distancia de visibilidad. Este cálculo se realiza también en base a los modelos analíticos de elementos finitos, o bien, mediante comprobaciones sección a sección en las que se ubica la intersección de la línea visual con el plano de cada sección transversal.

Sin embargo, la mayoría de estos modelos se orientan a la fase de diseño de la carretera, siendo necesario además, profundizar en procesos alternativos que permitan evaluar la visibilidad real de las carreteras existentes.

La tecnología LiDAR se ha aplicado en algunos campos de la ingeniería de carreteras tales como la obtención de información superficial del terreno para la localización y diseño de carreteras (Veneziano et al., 2003), la extracción de características de la carretera (Alharthy et al., 2003) o la modelización de las líneas centrales de la carretera (Cai et al., 2008).

La obtención de superficies desde las nubes de puntos LiDAR ha sido ampliamente utilizada en la generación de Modelos Digitales del Terreno (MDT) y Modelos Digitales de Superficies (MDS), utilizando frecuentemente para ello dos estructuras: cálculo de TINs (Triangular Irregular Nets) o una imagen basada en una malla regular formada por celdas (Korte, 1997).

El cálculo de un TIN se basa en el cálculo de triángulos formados por los puntos LiDAR. Este modelo presupone que los puntos incluidos en su interior pertenecen al plano formado por los puntos del triángulo (Bosque, 1997). La elevación de cualquier punto que pertenezca al triángulo se obtiene por interpolación. La estructura basada

en una imagen utiliza celdas como unidades de observación y en su interior se asigna un único valor de altura. La obtención de superficies a partir de datos LiDAR mobile ha sido empleada en la evaluación de visibilidades mediante algoritmos Ray-tracing; sin embargo, debido a la enorme densidad de puntos característica de la tecnología LiDAR, esta forma de proceder plantea problemas de tiempo de proceso en la generación de superficies, limitando su uso en la práctica y obligando a realizar reducciones en el volumen de la información de partida cuyo efecto sobre la visibilidad obtenida queda por evaluar (Charbonnier, 2010).

Por su parte Khattak et al. (2003) emplearon datos LiDAR aéreo en la evaluación de la distancias de visibilidad en intersecciones generando modelos tridimensionales formados por superficies.

Khattak et al. (2005) analizaron asimismo el uso de datos LiDAR aéreo combinados con ArcGis para evaluar la distancia de visibilidad de parada y adelantamiento en carreteras rurales de dos carriles.

Tsai et al. (2011) desarrollaron una metodología basada en la obtención de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a partir de datos LiDAR aéreo que permite obtener un cierto porcentaje de obstrucciones que impiden la visión en intersecciones. Algunas de las obstrucciones, no obstante, no pudieron ser detectadas por las bajas densidades de puntos relativas al tamaño del obstáculo.

Constantinos et al. (2012) emplearon datos LiDAR procedentes de un escáner laser terrestre para la obtención de las características geométricas y las distancias de visibilidad en intersecciones, mediante la creación de modelos tridimensionales a partir de los datos LiDAR.

Todos estos modelos tienen en común la generación de superficies continuas a partir de los datos

LiDAR originales para la obtención de las visibilidades, por lo que todos ellos presentan las mismas limitaciones derivadas del tiempo de proceso que éstas requieren.

Por su parte, las metodologías de cálculo basadas en perfiles transversales de la carretera obtenidos mediante técnicas LiDAR cuentan, por su propia concepción, con una importante limitación en su uso desde observadores externos a la carretera, además de los problemas asociados a la transformación de las realidades LiDAR complejas, en un perfil transversal simplificado.

Es necesario por tanto, continuar con la elaboración de métodos alternativos que permitan obtener visibilidades sin recurrir al uso de perfiles o a la formación de superficies.

3. Objetivos

El objetivo de la investigación ha sido desarrollar un sistema de obtención de visibilidades 3D a partir de los puntos LiDAR, alternativo a aquellos sistemas basados en la formación de superficies o en la obtención de secciones transversales.

4. Sistema desarrollado

El sistema desarrollado se basa, por un lado, en la consideración de la región del espacio constituida por dos planos verticales paralelos, ubicados a una distancia $a/2$ de la línea visual trazada entre el observador y el obstáculo denominada prisma visual (Figura 2), y por otro lado, en la división de esta región del espacio en unidades prismáticas

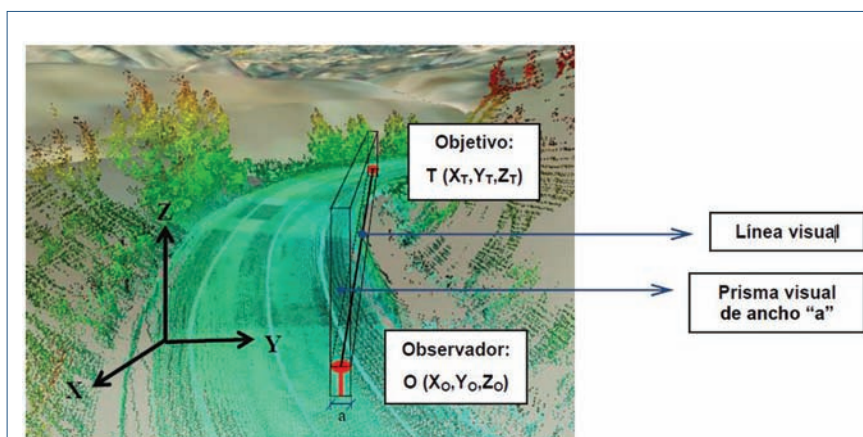


Figura 2. Prisma visual: región del espacio considerada entre los puntos del observador y del objetivo.

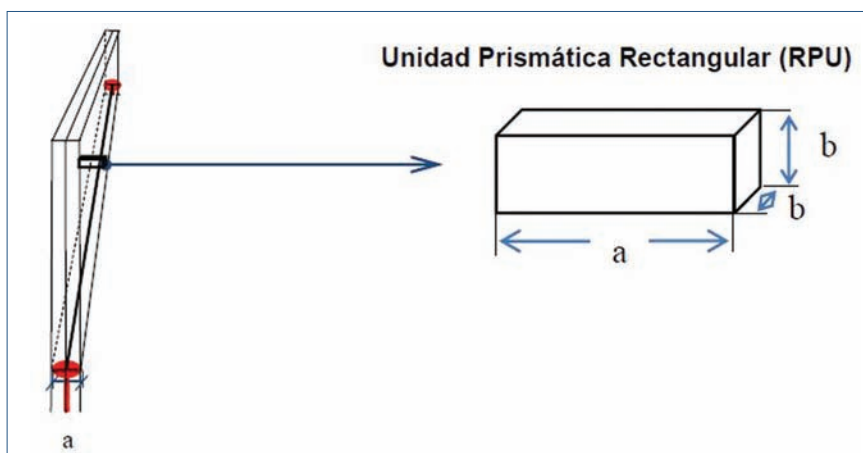


Figura 3. Unidad prismática rectangular (RPU) en que se divide el prisma visual.

rectangulares (RPU), de dimensiones a y b (Figura 3). Las RPU son de concepción similar al vóxel (volumetric pixel) pero a diferencia de éste, de dimensiones no necesariamente cúbicas, pudiendo tener o no puntos LiDAR en su interior. Tanto a como b son parámetros introducidos por el usuario en función de la densidad y precisión de la nube de puntos de que se disponga.

Para optimizar los tiempos de proceso, de la nube de puntos original se considerarán tan sólo aquellos puntos $P_i (X_i, Y_i, Z_i)$ susceptibles de constituir un obstáculo a la visión, es decir, aquellos situados dentro del prisma visual (Figura 4).

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

En primer lugar, los puntos LiDAR originales 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 RPU en la que se encuentran con el plano vertical (Figura 5).

En este plano vertical se sitúa un nuevo sistema de referencia local bidimensional $X'Y'$ en el que han de expresarse los puntos (Figura 6).

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

Cada celda cuadrada en la que queda dividido el plano $X'Y'$, en la que se encuentre al menos un punto de coordenadas $P'_i (X'_i, Y'_i)$, será considerada como un obstáculo a la visión.

De igual manera, la ecuación de la recta visual trazada desde el observador O hasta el objetivo T debe asimismo expresarse en el nuevo sistema de referencia $X'Y'$, obteniendo los puntos de dicha recta (X'_{vi}, Y'_{vi}) .

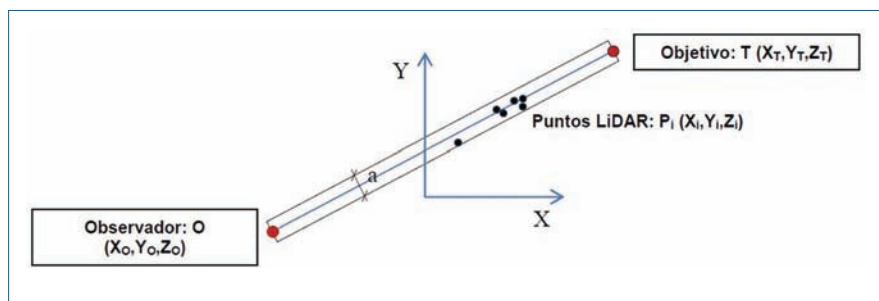


Figura 4. Vista en planta de la proyección vertical sobre el plano XY de los puntos correspondientes al observador, al objetivo y a los puntos LiDAR.

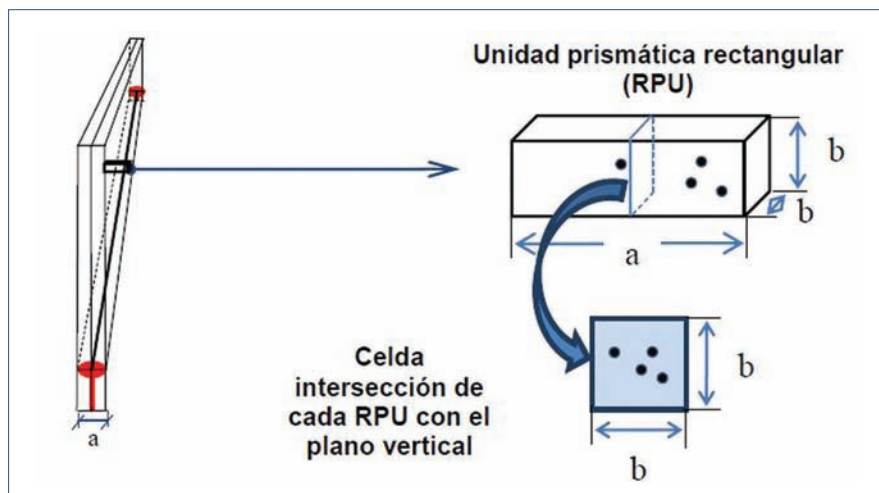


Figura 5. Proyección de los puntos LiDAR sobre el plano vertical que contiene al observador y al objetivo.

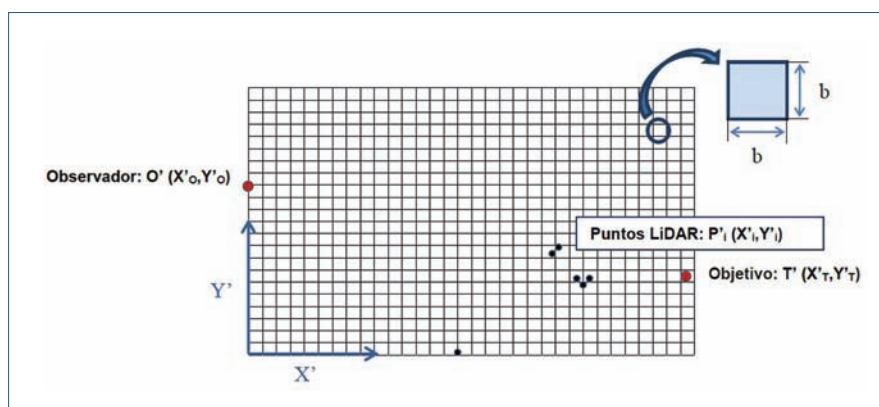


Figura 6. Sistema de referencia local bidimensional $X'Y'$.

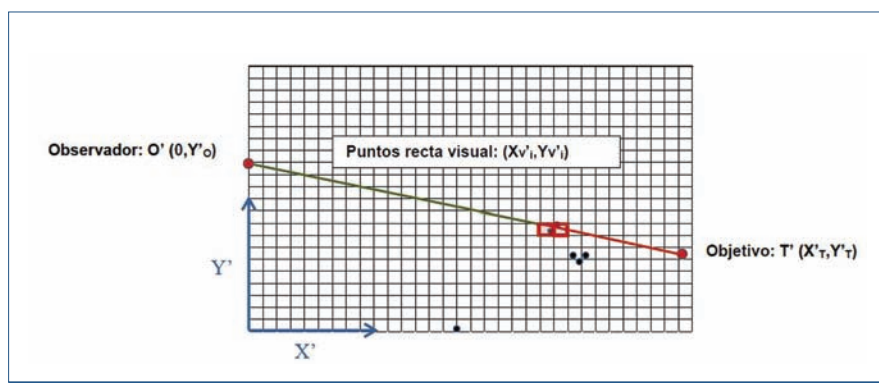


Figura 7. Proceso de localización del obstáculo visual en el sistema de referencia local bidimensional $X'Y'$.

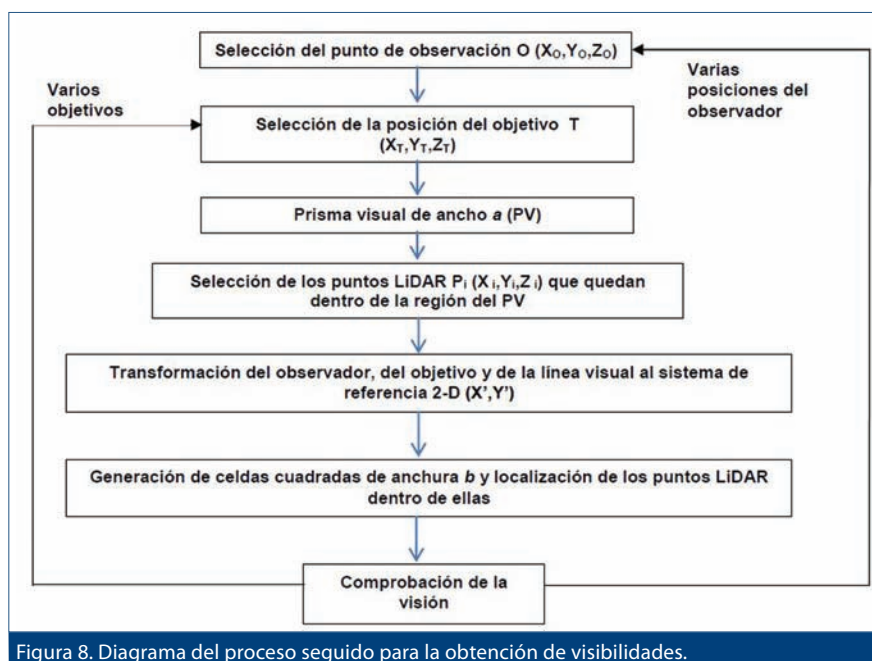


Figura 8. Diagrama del proceso seguido para la obtención de visibilidades.

La comprobación de la visión se realiza recorriendo todos los puntos (X'_{vi}, Y'_{vi}) de la recta visual desde la posición del observador hasta que se encuentre una celda opaca (línea verde), punto a partir del cuál deja de haber visión (línea roja, Figura 7).

Por su propio funcionamiento, las coordenadas del punto medio de la celda en la que se produce el obstáculo a la visión, expresadas en el sistema de referencia original de los puntos, son fácilmente identificadas en el proceso.

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).

Para obtener la distancia de visibilidad disponible a lo largo de la carretera, el proceso se repite para cada punto kilométrico en que se ubica el observador, alejando el objetivo de él un incremento de distancia de valor constante seleccionado por el usuario, hasta que se obtiene la primera interrupción a la visión de acuerdo con lo expresado en el diagrama de la Figura 8.

5. Caso analizado

El sistema ha sido aplicado a un tramo de la carretera CV-35, localizada en la provincia de Valencia (España). El tramo seleccionado es una carretera rural de dos carriles situada en terreno accidentado, donde la geometría ofrece ubicaciones de interés para el cálculo de visibilidades.

Para la obtención de los datos LiDAR se ha empleado el sistema IPS-2 de Topcon. Este sistema cuenta con unidad de medición inercial de 100 Hz, un sistema de posicionamiento global por satélite (GNSS) de 20 Hz, un odómetro y tres láser scanner SICK de 75 Hz

que permiten obtener la posición de 40.000 puntos por segundo (Figura 9).

El error cuadrático medio en la determinación de la posición absoluta de un punto a 10 m de distancia sin pérdida de señal GNSS, es de 0,055 m en planimetría y de 0,04 m en altimetría.

La toma de datos se ha realizado con velocidades de circulación comprendidas entre 40 y 60 km/h sin que sea necesaria la interrupción del tráfico.

Para la visualización tanto de la nube de puntos LiDAR como de las visuales obtenidas, se ha empleado la tecnología de navegación tridimensional desarrollada por Inproaudit y Dielmo 3D que además superpone esta información con un modelo digital del terreno de alta resolución obtenido a partir de los datos LiDAR aéreo del Instituto Geográfico Nacional. De este modo se facilita la identificación de los obstáculos a la visión.

En esta carretera, tres ubicaciones han sido seleccionadas:

- Caso 1: curva a derechas próxima a un talud de desmonte (del P.K. 62+300 al P.K. 62+500).
- Caso 2: intersección con detención obligatoria y giros a izquierda permitidos (P.K. 59+200).
- Caso 3: curva a derechas próxima al pretil de un puente (del P.K. 61+050 al P.K. 61+150).



Figura 9. Equipo IPS-2 de Topcon.

De acuerdo con la guía de diseño geométrica española (M. Fomento, 1999), las visuales se han trazado desde un observador situado a 1,10 m de altura sobre la calzada, hasta un obstáculo situado a 0,20 m de altura siguiendo una línea equidistante 1,50 m del borde exterior de la calzada en los casos 1) y 3) y a 1,10 m siguiendo la línea central de los carriles de circulación en el caso 2).

La anchura del prisma visual fue de $a = 0,50$ m, que se mostró adecuada para la densidad de la nube de puntos de partida. Valores inferiores de a no consiguieron localizar todos los obstáculos en algunos casos.

El tamaño de las RPU se completó con una dimensión de $b = 0,05$ m adecuada a la precisión de posicionamiento de los puntos prevista por el fabricante del equipo. Las celdas cuadradas en que quedó dividido el plano $X'Y'$ fueron por tanto de $0,05 \times 0,05$ m, no obstante, futuras investigaciones son necesarias para determinar los valores más adecuados de los parámetros a y b para diferentes precisiones y densidades de la nube de puntos de partida.

La representación tridimensional en el sistema de referencia UTM original tanto de las visuales como de la nube de puntos, permite identificar y validar las obstrucciones a la visión detectadas en el proceso, habiéndose encontrado una correcta correspondencia en todos los casos, incluso con aquellos obstáculos de menor dimensión tales como postes de señales, barandillas de pretilas de puente o vegetación de baja frondosidad. A tal efecto, las visuales se han representado en color verde mientras existe visión y en color rojo desde que dicha visión es interrumpida por la presencia de algún obstáculo (Figuras 10, 11 y 12).

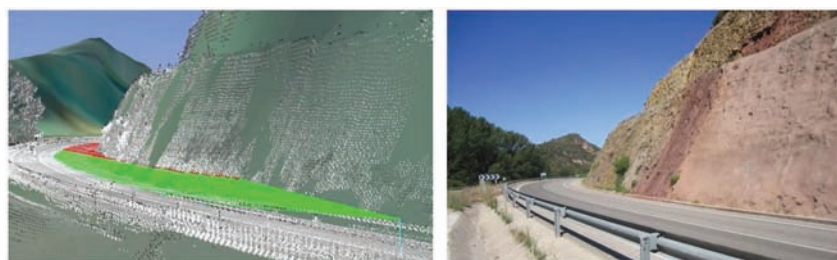


Figura 6. Sistema de referencia local bidimensional $X'Y'$.

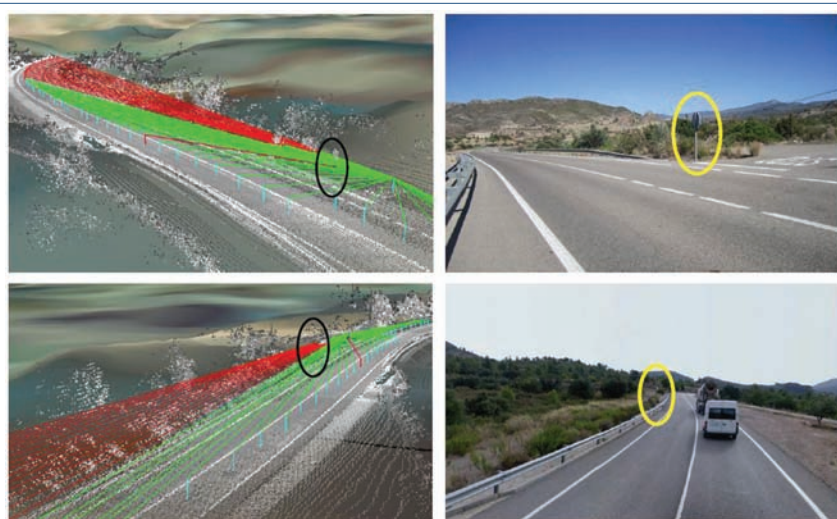


Figura 7. Proceso de localización del obstáculo visual en el sistema de referencia local bidimensional $X'Y'$.



Figura 7. Proceso de localización del obstáculo visual en el sistema de referencia local bidimensional $X'Y'$.

6. Conclusiones

En este artículo se presenta una nueva metodología desarrollada para la obtención de líneas visuales en carreteras existentes basada en nubes de puntos LiDAR mobile, que no requiere la generación de modelos tridimensionales formados por superficies, ni el uso de perfiles transversales de la carretera.

Para ello, el sistema se basa en la subdivisión del espacio en unidades prismáticas rectangulares (RPC), así como en la transformación del problema tridimensional original en un

problema bidimensional.

Las dimensiones de las RPC determinan la precisión del sistema y deben ser coherentes con la densidad de datos de la nube de puntos original y con la precisión que el sistema empleado arroja en la posición absoluta de los puntos.

El sistema desarrollado ha sido aplicado a tres localizaciones reales de carretera con diferentes motivos de obstrucción a la visión: una intersección y dos tramos curvos de una carretera convencional de dos carriles.

Con los datos obtenidos de un

sistema LiDAR mobile IPS-2, la representación tridimensional conjunta, tanto de las visuales como de la nube de puntos LiDAR ha arrojado una correcta identificación de los obstáculos para dimensiones de RPC de 0,50 x 0,05 x 0,05 m, incluso para obstáculos de pequeña dimensión, tales como el poste de las señales o las barandillas de los pretilos de un puente. Investigaciones posteriores son, no obstante, necesarias para establecer las dimensiones de las RPC que mejor precisión y menor tiempo de proceso arrojan para diferentes densidades y precisiones de la nube de puntos original. Es asimismo importante caracterizar el efecto del "ruido" generado por los vehículos en circulación durante la toma de datos, para evitar la detección de obstrucciones a la visión irreales.

La información proporcionada por las nuevas tecnologías LiDAR, la flexibilidad y simplicidad del sistema propuesto y su implementación en herramientas de visualización tridimensional, permite llevar a cabo análisis de visibilidades reales disponibles hasta ahora impensables, eliminando los problemas inherentes al uso de técnicas basadas en perfiles transversales y los asociados a los tiempos de proceso de los sistemas que requieren la generación de superficies.

De esta forma, el conocimiento de la visibilidades reales en las carreteras existentes de una forma totalmente visual para el ingeniero, así como la posibilidad de identificar y georreferenciar los obstáculos, podrán constituir un importante avance en la práctica diaria de los ingenieros de seguridad vial.

7. Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a Topcon España por su colaboración en la adquisición de los datos y a Inproaudit® y Dielmo 3D® por el desarrollo de los algoritmos de visualización tridimensional.

8. Referencias Bibliográficas

- [1] AASHTO (2011). "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets".
- [2] Alharthy, A. y Bethel, J. (2003). "Automated Road Extraction from Lidar Data". ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings, Anchorage (Alaska). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- [3] Barber, D., Mills, J. y Smith-Voysey, S. (2008). "Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 63. Issue 1, pp 128-141.
- [4] Bosque, J. (1997). "Sistemas de Información Geográfica". 2ª ed.. Madrid: Ediciones Rialp.
- [5] Cai, H. y Rasdorf, W. (2008). "Modeling Road Centerlines and Predicting Lengths in 3-D Using Lidar Point Cloud and Planimetric Road Centerline Data". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 23, pp. 157-173.
- [6] Constantinos, A. y Tsakiri, M. (2012). "3D Laser Scanning as a Tool for Modern Road Design. A Methodology and Applications in Intersection Safety Analysis". Annual Meeting 2012. Transportation Research Board.
- [7] Charbonnier, P., Tarel, J-P. y Goulette, F. (2010). "On the Diagnostic of Road Pathway Visibility". Transport Research Arena Europe 2010, Brussels (Belgium).
- [8] Easa, S. (1993). "Lateral Clearance Needs on Compound Horizontal Curves". Journal of Transportation Engineering. Vol. 119, pp. 111-124.
- [9] Glennie, C. (2007). "Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems". Journal of Applied Geodesy 1, pp147-157.
- [10] Glennie, C. (2009). "Kinematic terrestrial light-detection and ranging system for scanning". Transportation Research Record, No. 2105, pp 135-141.
- [11] Hassan, Y., Easa, S. y Abd El Halim, A. (1996). "Analytical model for sight distance analysis on 3-D highway alignments". Transportation Research Record, No. 1523, pp. 1-10.
- [12] Ismail, K. y Sayed, T. (2007). "New algorithm for calculating 3D available sight distance". Journal of Transportation Engineering. Vol. 133, pp. 572-582.
- [13] Khattak, A., Hallmark, S. y Souleyrette, R. (2003). "Application of Light Detection and Ranging Technology to Highway Safety". Transportation Research Record. Vol. 1836, pp. 7-15.
- [14] Khattak, A. y Shamayleh, H. (2005). "Highway Safety Assessment through Geographic Information System-Based Data Visualization". Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 19, pp. 407-411.
- [15] Korte, B. (1997). "The GIS Book" (4ª ed). Santa Fe (EEUU). Onword Press.
- [16] M. Fomento (1999). "Norma 3.1-IC Trazado". Dirección General de Carreteras. Madrid.
- [17] Romero, M. y García, A. (2007). "Discussion of 3D Calculation of Stopping-Sight Distance from GPS Data". Journal of Transportation Engineering, Vol. 133, pp. 645-646.
- [18] Tsai, Y., Yang, Q. y Wu, Y. (2011). "Identifying and Quantifying Intersection Obstruction and Its Severity Using LiDAR Technology and GIS Spatial Analysis". Annual Meeting 2011. Transportation Research Board.
- [19] Veneziano, D., Souleyrette, R. y Hallmark, S. (2003). "Integration of Light Detection and Ranging Technology with Photogrammetry in Highway Location and Design". Transportation Research Record, Vol. 1836, pp. 1-6.
- [20] Yan, X., Radwan, E., Zhang, F. y Parker, J. (2008). "Evaluation of Dynamic Passing Sight Distance Problem Using a Finite-Element Model". Journal of Transportation Engineering, Vol. 134, pp. 225-235.

