

Tendencia mundial en tecnologías de sistemas de mapeo móvil implementadas con láser

Global trend in mobile mapping system technologies implemented with laser

Hernán Porras Díaz¹, Duvan Yahir Sanabria Echeverry²,
Johan Alexander Ortiz Ferreira³

¹Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España,
hporras@uis.edu.co

²Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, duvansan@uis.edu.co

³ Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, johan.ortiz1@correo.uis.edu.co

Fecha de recepción: 05/08/2018 Fecha de aceptación: 11/06/2018



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.11361>

Como citar: Porras Díaz, H., Sanabria Echeverry, D. Y & Ortiz Ferreira, J. A. (2018). Tendencia mundial en tecnologías de sistemas de mapeo móvil implementadas con láser. *AVANCES: INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA*, 15 (1), 204-230. DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.11361>

Resumen

El escáner láser móvil es una tecnología emergente que se ha venido afianzando en la industria LiDAR. Este instrumento tiene la capacidad de captar con precisión milimétrica información topográfica y geométrica de los objetos circundantes y operar en movimiento con la integración de cámaras con visión de 360° y receptores de posición y navegación. El avance tecnológico ha permitido integrar los sensores remotos para conformar los sistemas de mapeo móvil y proporcionar soluciones para la adquisición de datos espaciales de forma rápida y rentable. La información recolectada se utiliza para la navegación virtual a nivel de calle y la planeación urbana. El objetivo de este estudio es proveer una revisión del estado del conocimiento sobre la tendencia en la implementación de sistemas de mapeo móvil comerciales y prototipos desarrollados en la academia a nivel mundial indicando los antecedentes, las especificaciones técnicas de los equipos, el software de control y posprocesamiento, las plataformas tecnológicas de transporte, los fundamentos de diseño de los principales componentes y los proveedores de servicios.

Palabras clave: Cámaras con visión de 360°, georreferencia, LiDAR, sensores remotos, sistema de mapeo móvil.

Abstract

The mobile laser scanner is an emerging technology that has been taking hold in the LiDAR industry. This instrument has the ability to accurately capture topographic and geometric information of the surrounding objects and operate in motion with the integration of 360° cameras and position and navigation receivers. The technological advance has allowed to integrate the remote sensors to conform the systems of mobile mapping and to provide solutions for the acquisition of spatial data of fast and profitable form. The information collected is used for virtual navigation at the street level and urban planning. The objective of this study is to provide a review of the state of knowledge about the trend in the implementation of commercial mobile mapping systems and prototypes developed at the academy worldwide indicating the technical specifications and design fundamentals of the main components.

Keywords: Cameras with 360° vision, georeference, LiDAR, remote sensing, mapping mobile system.

1. Introducción

Inicialmente, la forma de realizar inventarios viales se basaba en inspecciones visuales en campo, ejecutadas por una comisión de especialistas encargada de diligenciar formularios y mapear manualmente los elementos viales durante el recorrido en carretera, procedimiento que se caracterizaba por ser lento, extenuante e impreciso. Por lo anterior, se han venido desarrollando sistemas automáticos móviles que captan el entorno y hacen mediciones sobre la superficie de la tierra de forma rápida, precisa y rentable [1, 7]. El avance de estos sistemas ha sido impulsado por las agencias de transporte y carreteras mediante el desarrollo de sistemas de inspección automática de pavimentos, Sistemas de Transporte Inteligente (ITS, por su sigla en inglés) y los Sistemas de

Información Geoespacial de Transporte (GIS-T, por su sigla en inglés) [8].

El desarrollo de los sistemas de mapeo móvil (MMS, por su sigla en inglés) comienzan con el uso de cámaras fotográficas [8, 9], pasando por cámaras de video, en que se fueron articulando con sensores de posicionamiento [8, 10, 12], posteriormente con la tecnología LiDAR (del inglés Light Detection and Ranging), y se convirtieron en una importante herramienta para la cartografía moderna [7], [13, 18]. Con el avance tecnológico de las plataformas de transporte, para la ejecución de estudios en diversos escenarios los MMS ampliaron la versatilidad usando diferentes tipos de plataformas móviles, como las terrestres [2, 19], las aéreas [1, 6, 20, 23, las fluviales [24] y los backpack [4, 25, 27].

Los MMS tienen la capacidad de combinar múltiples plataformas y

sensores remotos e integrar los datos para la aplicación en diversas disciplinas [8]. Los MMS están compuestos por sensores de captación de imágenes y por tecnología LiDAR, que permiten adquirir un conjunto de puntos que representan las coordenadas XYZ de la superficie de los objetos escaneados, que junto con la intensidad de color facilitan las mediciones y la representación de los elementos del entorno. Además, integran los sistemas de navegación para la georreferenciación de los datos y el DMI (del inglés Distance Measurement Instrument), que registra la distancia recorrida [17, 28]. Generalmente, para el procesamiento de los datos se requiere software desarrollado por los fabricantes de los LiDAR, con el fin de manipular, analizar y extraer objetos contenidos dentro de la nube de puntos [29].

Ahora bien, la calidad, precisión y rapidez de los MMS conllevan un proceso complejo en el diseño y ensamblaje de un MMS, que depende del diseño apropiado de la plataforma, de acuerdo con las necesidades del estudio, la calibración, las limitaciones de los sensores del sistema y la sincronización de los componentes ensamblados en la plataforma [2, 30, 31]. Por lo anterior, este artículo presenta una revisión general sobre los sistemas de mapeo móvil comercial y los prototipos desarrollados en universidades, con el fin de dar a conocer la tendencia en la implementación de estos sistemas automáticos para la adquisición de datos espaciales de una forma rápida, oportuna y rentable. En la sección

uno, se presenta en orden cronológico diversos trabajos que contribuyeron en el desarrollo de los MMS. En la sección dos, se muestran las plataformas de transporte, se presentan los principales componentes tecnológicos y los lineamientos para el diseño de los MMS. En la sección tres, se describen los sistemas comerciales recientes y prototipos, y algunos proveedores de servicios que utilizan esta tecnología. Por último, se presentan las tendencias y el trabajo futuro, y se exponen algunas conclusiones con respecto al estado del conocimiento de las tecnologías de los sistemas de mapeo móvil. Para la revisión bibliográfica, se utilizan diversas fuentes de revistas científicas, memorias de conferencias, páginas web y reportes de compañías relacionados con los sistemas de mapeo móvil.

2. Antecedentes

Este apartado presenta un resumen organizado cronológicamente sobre el desarrollo tecnológico de los sistemas de mapeo móvil. En la década de los setenta, algunas agencias de transporte realizan la inspección de vías pavimentadas con la técnica de registro fotográfico (del inglés photo-logging). Un ejemplo es el sistema PASCO Roadrecon, que usaba una cámara de 35 mm para la grabación continua de la superficie del pavimento, método adoptado por el programa LTPP, que administra la Federal Highway Administration, de los Estados Unidos (FHWA, por su sigla en inglés). Sin embargo, la revisión de la película y la transferencia de los datos son costosos

y requieren tiempo considerable [9]. Posteriormente, para realizar inventarios viales, surge el sistema de registro por video (del inglés video-logging) integrado con sistemas de posicionamiento global (GPS, por su sigla en inglés). El registro de video redujo el tiempo de procesamiento de la película, en comparación con el registro fotográfico, pero las imágenes del video tienen baja resolución, y el sistema utiliza una sola cámara, lo que limita el inventario [8].

A finales de los años ochenta, se implementa el sistema móvil de inventario de carreteras (MHIS, por su sigla en inglés) denominado Alberta Móvil. Usaba cámaras de video para grabar los corredores viales; giroscopios, acelerómetros y odómetros, para determinar la ubicación y orientación del vehículo, así como GPS diferencial, para mejorar la precisión de posicionamiento de los datos recolectados. Además, utiliza un sistema inercial strapdown para mejorar la precisión en la orientación de la cámara; el vehículo puede conducirse hasta 70 km/h con precisión de localización de 0.2 a 0.3 m [10].

En la década de los noventa surgieron los primeros centros de investigación con avances en MMS terrestre. Entre ellos se encuentra el Departamento de Ingeniería en Geomática de la Universidad Calgary de Canadá, y el Grupo en Cartografía de la Universidad Estatal de Ohio (OSU, por su sigla en inglés), de los Estados Unidos. El avance importante fue integrar una serie de cámaras de video en el sistema e incorporar la información contenida en

las imágenes en el proceso de medición. En esta década aún se recolectan datos de carretera de modo analógico, y se digitalizan manualmente después del levantamiento, que lo hace un proceso tedioso y demorado [10, 11].

El sistema GPSVan fue el primer sistema MMS para la recolección de datos cartográficos, desarrollado inicialmente por FHWA, y mejorado, ensamblado y demostrado por la OSU. Este sistema usaba un receptor GPS para la localización geográfica, dos cámaras digitales CCD (del inglés Charge-coupled device), dos cámaras de video a color, una unidad topográfica inercial, compuesta por dos giroscopios y un codificador. Los datos captados son almacenados directamente en una base de datos relacional. El sistema logró una precisión de localización de aproximadamente 0.1 m para objetos a menos de 20 m del vehículo [11].

A mediados de la década de los noventa, se avanza en el sistema denominado VISAT, desarrollado por la Universidad de Calgary y la empresa GEOFIT Inc., de Canadá. El sistema está compuesto por un GPS, una cámara de video S-VHS, un sistema antibloqueo de frenos (ABS, por su sigla en inglés), una unidad de control de imagen, la integración de ocho cámaras CCD y un sistema inercial strapdown. El VISAT capta imágenes en blanco y negro georreferenciadas a 60 km/h, con precisión de posicionamiento de 0,3 m respecto del marco de trabajo de control, y precisión relativa de 0.1 m para puntos que están en un radio de 35 m [8, 12].

Desde 2000 hasta 2003, el Instituto de Cartografía de Cataluña desarrolla el MMS denominado GEOVAN. El proyecto consiste en integrar diversos subsistemas. El primero es la adquisición de imágenes mediante dos cámaras digitales de 1024 x 1024 píxeles, para obtener solapamiento estereoscópico a 10 m del vehículo. El segundo es el subsistema de orientación para manejar la referencia absoluta, temporal y geométrica de las imágenes, por medio del kit de Applanix, compuesto por una unidad de medición inercial (IMU, por su sigla en inglés), el sistema de dos antenas GPS para la medición de acimut (GAMS, por su sigla en inglés), un DMI (del inglés Distance Measurement Instrument) y un sistema de control por hardware y software. Luego la sincronización para crear el marco de referencia temporal para todos los sensores que operan señales PPS, TTL y Resync. Posteriormente, el control de energía eléctrica y del entorno para estabilizar las condiciones de alimentación y operación. Por otra parte, la plataforma física para atenuar las vibraciones e instalar los sensores en una determinada posición. Finalmente, un láser escáner terrestre (TLS, por su sigla en inglés) para escanear las fachadas de los edificios, mientras el vehículo se mueve. El sistema GEOVAN también aplica la técnica de estereoscopía para la reconstrucción tridimensional [7].

En 2005, el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) desarrolla un MMS denominado GEOMOBIL, que está conformado por dos cámaras CCD a

blanco y negro, que forman modelos estereoscópicos de la zona de interés, un sistema de orientación compuesto por un IMU, un DMI y un sistema GAMS de dos antenas receptoras GPS: una de doble frecuencia para obtener datos de posición y velocidad y otra de una sola frecuencia para determinar con precisión el ángulo de partida. El escáner láser que utiliza es el Riegl Z-210, para obtener una nube de 10,000 puntos/s. El sistema tiene una precisión de 0.3 m a distancias inferiores de 20 m, pero se afecta drásticamente por distancias superiores a 40 m [13].

En los últimos 10 años, la tecnología MMS ha avanzado rápidamente en términos de definición y precisión de los datos. Compañías como Google, Fugro Roadware, Geo-3D, IGI mbH, Tele Atlas, Elphel Inc. y NAVTEQ, entre otras, han adoptado e integrado tecnología en gran escala para la cartografía móvil, utilizando cámaras de alta resolución con visión esférica, tecnología LiDAR y receptores GNSS (del inglés Global Navigation Satellite Systems) con precisión milimétrica [8,14,18]. Los MMS se utilizan principalmente para la captación de datos espaciales de la infraestructura vial y las fachadas de edificaciones, el seguimiento de la arquitectura de la ciudad y los inventarios urbanísticos. Sin embargo, el avance de las tecnologías y las diferentes plataformas de transporte han contribuido en la aplicación de otros campos, como la seguridad aérea, el seguimiento y monitoreo de cobertura del suelo, el modelamiento tridimensional, el monitoreo de erosión

costera o el seguimiento de inventarios forestales y de la minería, entre otros [5]. La tecnología MMS ha tenido un avance acelerado en términos de costo y precisión, que son dos aspectos utilizados para evaluar un sistema de mapeo [3], citado por [32].

2.1 Tecnología de mapeo móvil

En función del tipo de estudio y las características en cuanto a resolución, rango de cobertura y precisión, los sistemas de escaneo láser móvil se pueden clasificar en cartografía y topografía (del inglés *mapping and surveying*) [18]. Sin embargo, una característica común de los MMS es que tienen más de una cámara acoplada en una plataforma móvil para permitir mediciones tridimensionales, y por medio de sensores de navegación, realizar la georreferenciación directa de las imágenes y de la nube de puntos [8]. El presente documento profundiza en los *mapping mobile system* (MMS, por su sigla en inglés) que se pueden utilizar para diversas aplicaciones de la cartografía moderna.

Los MMS se componen de diferentes sensores para proporcionar cantidades geométricas (GPS, IMU y LiDAR). Sin embargo, el nombre cambió a Tecnología de Mapeo Móvil (MMT, por su sigla en inglés), pues ha venido aumentando la complejidad de los MMS, debido a la relación con el avance tecnológico, el diseño y la optimización de los flujos en las etapas de captación y el procesamiento que existe en estos sistemas.

2.2 Plataformas

Una de las principales variables en los MMS es la condición del terreno para movilizar el sistema. Las plataformas para MMS son la respuesta ingenieril para acoplar la tecnología LiDAR y los demás componentes, en un MMS funcional que pueda operar en cualquier entorno. En la actualidad existen tres tipos de plataformas para los MMS: los terrestres (del inglés *Land-based*), los aerotransportados (del inglés *Airborne*) y el tipo morral (del inglés *Backpack carrier*).

Land-based es la plataforma física que brinda el soporte necesario para que el MMS se desplace por carreteras pavimentadas, sobre nieve y en agua, lo que ofrece una forma innovadora de adquirir información geoespacial por vía terrestre, de forma ágil, precisa y georreferenciada [2, 19].

Por otro lado, los *Airborne* hacen referencia a la plataforma aérea que transporta los sistemas MMS. En 1965 la plataforma se usó junto con perfiladores de láser de gas [33] y otro basado en un láser semiconductor [34], citado por [35], para medir alturas con los métodos de desfase de onda y tiempo de vuelo. Durante la década de los setenta y ochenta, hubo un desarrollo constante de los perfiladores láser, pero con la limitante de solo poder adquirir datos de elevación a lo largo de una sola línea, durante un vuelo individual, y para cubrir un terreno completo, se necesitaban varios sobrevuelos. Sin embargo,

en la década de los noventa, el avance acelerado de los láseres y la introducción de la georreferenciación directa permitió la adopción de los láseres en el aire, y la capacidad de entregar datos de posición aerotransportados con una precisión de 0.04 a 0.07 m, lo que garantizó el uso generalizado del escaneo láser en los Airborne [23].

Ahora bien, las plataformas usadas para los MMS aerotransportados generalmente son avionetas y helicópteros. Sin embargo, con la evolución de los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por su sigla en inglés), se crearon nuevas plataformas aéreas para diversos entornos de trabajo (Schiebel, 2016). Inicialmente, la invención de los UAV se convirtió en herramienta para las Fuerzas Armadas, con fines de guerra, labores de espionaje y entrenamiento militar, en que se usaban cámaras fotográficas aerotransportadas, y se cargaban proyectiles o cargas nucleares [20, 22].

Por lo anterior, los requerimientos militares generaron el avance tecnológico en la elaboración de dispositivos pequeños y ligeros, la integración de sensores de posición y navegación en plataformas de radio controlado, y la evolución de los circuitos integrados y la tecnología LiDAR, lo que permite hoy en día integrar los UAV y los escáneres láser, de forma compacta y funcional [20, 22].

Por consiguiente, algunas soluciones LiDAR aerotransportadas o para plataforma aérea son RiCopter con el VUX-1 integrado de Riegl; AL3 S1000+ Copter de

Phoenix Aerial Systems; AX80 de Trimble o HDL-32E de Velodyne, entre otros [6, 36, 37]. Un ejemplo de un vehículo aéreo no tripulado con LiDAR, desarrollado por el mismo fabricante de escáneres láser, es el RiCopter, de la empresa Riegl [1, 38, 39].

Por último, los backpack son la solución para recopilar y acelerar la recolección de datos en zonas urbanas peatonales, interiores de edificaciones, patrimonios con acceso limitado, zonas subterráneas o senderos angostos. Algunos ejemplos representativos son el backpack Akhka R2 de ROAMER, que está conformado por un sistema GNSS/IMU NovAtel Flexpak6 y un láser escáner FARO Focus 3D 120, que, en conjunto, tiene un peso ligero, para que pueda operarse por una sola persona, y el Pegasus backpack de Leica, compuesto por cinco cámaras de 5.5 megapíxeles, dos láseres escáner Velodyne VLP-16 de 60000 puntos por segundo, un sensor GNSS/IMU/SPAN con banda triple, para las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, y la nueva tecnología SLAM (del inglés Simultaneous Localization and Mapping), que permite orientar el MMS, cuando se pierde la señal, con el sistema GNSS/IMU [4, 25, 27].

2.3 Principales tecnologías

En este estudio, se enfatiza principalmente en las tecnologías que integran los sistemas MMS, los sensores de imágenes digitales y los receptores GNSS/IMU para la georreferenciación de los datos, entre otros sensores de medición, para obtener

mayor detalle del entorno y mejorar la precisión de los resultados.

2.3.1 Cámaras

Actualmente, las soluciones comerciales de MMS utilizan cámaras con visión esférica para obtener mayor área de cobertura visual, a una velocidad de captación requerida por el sistema, así como para asignarle un nivel de intensidad de color a la nube de puntos y tener un registro fotográfico [18, 40, 44]. También se pueden utilizar cámaras individuales distribuidas en diferente dirección [18, 19, 45]. Las cámaras con visión esférica tienen, generalmente, un conjunto de sensores tipo CCD o CMOS (del inglés Complementary metal-oxide-semiconductor), que integrados operan simultáneamente durante la captación de las imágenes. Existen diversos proveedores de sistemas de cámaras para MMS: Point Grey Research, de Richmond B.C., Canadá; Immersive Media Company, de Kelowna B.C., Canadá; Logipix Technical Development Ltd., de Hungría; GoPro, de los Estados Unidos; Elphel Inc., de Salt Lake SLC (Utah), los Estados Unidos; Giroptic, de Lille, Francia; y NCTech, de Escocia. Actualmente existe en el mercado un amplio rango de cámaras con visión esférica, y cada una tiene diversas especificaciones técnicas, según los requerimientos de estudio o de negocio, como se muestra en la Tabla 1.

Generalmente, las características técnicas más importantes de una cámara de visión esférica para MMS son el número de sensores para poder

obtener mayor cobertura y detalle; el tipo de sensor CCD o CMOS porque presentan diferencias en cuanto a respuesta uniforme, disminución de ruido y rango dinámico [46, 47]; la resolución en píxeles que tiene cada sensor para obtener imágenes panorámicas de alta calidad; el campo de visión que describe el ángulo de cobertura vertical y horizontal; el porcentaje esférico que está relacionado con el área de cobertura de una esfera; y la velocidad en la transmisión de los datos que depende de la interfaz de comunicación.

2.3.2 Escáneres láser

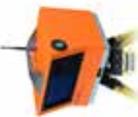
Los escáneres láser son instrumentos que utilizan la tecnología láser para medir las dimensiones de los objetos. Opera mediante el subsistema de telemetría LiDAR y el dispositivo óptico o mecánico, para dirigir el haz de láser sobre el área de interés, y como resultado, obtiene una nube de puntos del objeto con coordenadas X, Y y Z de alta precisión [29]. Los dos tipos de escáneres más comunes son los de tiempo de vuelo (TOF, por su sigla en inglés) y los de diferencia de fase (PD, por su sigla en inglés). Algunos escáneres comerciales basados en la tecnología TOF son Topcon GLS-2000, Trimble TX8, Leica P40 o Riegl VQ-450, entre otros. Algunos escáneres comerciales disponibles basados en la tecnología PD son Z+F Imager 5010X y Callidus CPW 8000 [35], entre otros. En la Tabla 2, se resumen las características técnicas más importantes que se deben tener en cuenta en el momento de adquirir un escáner láser terrestre.

Tabla 1. Características técnicas de las cámaras esféricas comerciales

Cámara/ características	Point Grey Ladybug 5	Immersive Media Dodeca 2360	Logipix Panorama 360°	GoPro Odyssey Panoramic capture rig	Elphel Eysis-4PI	Giroptic 360Cam	NCTech Iris360
Sensores	6 sensores CCD Sony ICX655	11 sensores Sony 1/3"	9 sensores 1/2" color CMOS	16 cámaras GoPro con módulos Hero4	24 sensores	3 sensores	4 sensores de 10 MP c/u
Campo de visión	360° horizontal 290° vertical	360° horizontal 290° vertical	40° por cámara/ hasta 360°	360° horizontal 360° Vertical	360° horizontal 180° vertical	360° horizontal 300° vertical	360° en la horizontal y 137.5° vertical
Porcentaje de visión esférica	90%	Máximo 96%	100%	100%	75%	Máximo 83%	70%
Resolución	5 MP por sensor o 2048 x 2448 píxeles	2400 x 1200 píxeles por frame o 3 MP en total	41,472 (H) x 3288 (V) o 135 MP	2k x 2k y 8k x 8k	5 MP por sensor o 64 MP con imagen cocida	2048 x 1024	40 MP
Velocidad en la transmisión de los datos	10 FPS con la máxima resolución	30 FPS	5 fps a 100 MP o 12 fps a 25 MP	25 PAL o 30 NTSC fps	5 FPS	25-30 fps	1 frame entre 4 a 6 s
Interfaz de comunicación	USB 3.0	GigE	—	—	—	Wi-Fi o USB	USB 3.0, USB OTG 3, WIFI 802.11n
Imagen							

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Características técnicas de los escáneres láser

Empresas /características	TOPCON, Japón	TRIMBLE, EE.UU.	OPTECH, Canadá	LEICA, Suiza	RIEGL, Austria-EE.UU.	FARO, Alemania-Singapur	ZOLLER + FRÖHLICH, Alemania- RU-EE.UU.
Nombre del láser	GLS-2000	TX8	ILIRIS – LR	P40	VZ-6000	Faro Focus 3D X330 HDR	Z+F Imager 5010X
Tecnología de medición	TOF	TOF	TOF	TOF	TOF	TOF	PD
Alcance mínimo (con reflectancia)	40 m con 9%	0,6 m	3 m	0,4 m	5 m	0,6 m	0,3 m
Alcance máximo (con reflectancia)	350 m con 90%	340 m	3.000 m con 80%	270 m con 34%	6.000 m con 90%	330 m con 90%	187,3 m
Precisión	—	12,7 mm	4 mm (a 100 m)	—	10 mm	—	—
Exactitud	3,5 mm (en 1 a 150 m)	<2 mm (en 2 a 100 m)	—	3 mm (a 50 m)	15 mm	2 mm	≤1 mm
Cantidad máxima de puntos/segundos	120.000	Un millón	10.000	Un millón	222.000	976.000	1.016 millones
Angulo de escaneo horizontal	360°	360°	40°	360°	360°	300°	360°
Angulo de escaneo vertical	270°	317°	40°	290°	60°	360°	320°
Clase	1M o 3R	1	1, 1M o 3	1	3B	1	1
Almacenamiento	SD, SDHC Clase 6	USB 3.0 Flash	USB	SSD de 256 GB, USB	SSD de 80GB, USB	SD, SDHC, SDXC de 32GB	USB de 64 GB
Clase de protección polvo/humedad	IP54 JIS C0920, IEC60529	IP54	IEC 60825-1	IP54 (IEC 60529)	IP64	—	IP53
Imagen							

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, los TLS tienen una variedad de parámetros que los caracteriza: la precisión, que es el grado de repetibilidad de las mediciones; la exactitud, que es la cercanía de los valores obtenidos al valor verdadero [29]; la tecnología de medición PD, que consiste en el cálculo del desfase entre una onda continua, emitida de amplitud modulada, y la reflejada o el TOF, que se basa en el tiempo que demora un pulso en regresar al láser después de emitirse. La TOF se destaca por poseer un alto alcance, pero los tiempos de recolección de datos son largos, porque debe esperar que el pulso emitido se refleje y vuelva, para poder generar el siguiente pulso. En contraposición, el PD se caracteriza por la adquisición de datos en poco tiempo, por la mayor precisión, la alta resolución de datos y un alcance menor en comparación con el TOF [18]. Los rangos mencionados para PD y TOF se calculan según las ecuaciones (1) y (2), respectivamente [18, 29]:

$$R_{PD} = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi \quad (1).$$

Donde λ longitud de onda modulada y φ es el cambio de fase.

$$R_{TOF} = \frac{1}{2} \frac{c\Delta t}{2} \quad (2).$$

Donde c es la velocidad de la luz y Δt es el tiempo de vuelo del pulso.

Por otra parte, el parámetro llamado ángulo de escaneo vertical o campo de visión es el rango en grados para la toma de datos en la dirección vertical, como se muestra en la Figura 1. Donde α y β son los ángulos de escaneo vertical.

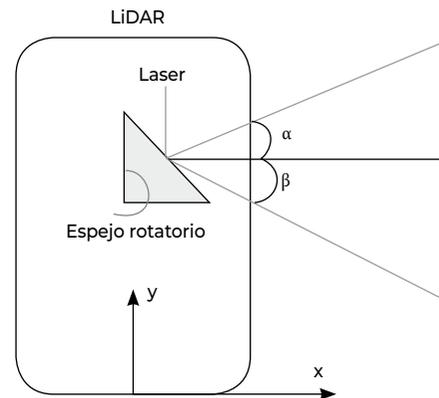


Figura 1. Campo de visión del LiDAR [29, 18].

Por último, el parámetro para la clasificación LiDAR se define como la exposición máxima permisible sobre la visión (MPE, por su sigla en inglés) y se determina, por el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI, por su sigla en inglés), de acuerdo con el grado de riesgo a la seguridad ocular. El rango de la clasificación va desde la clase I, pasando por la clase IM, clase II, clase IIM, clase IIMR, clase HIB, hasta la clase IV; y la clase I no conlleva peligro de ningún tipo a la salud visual y física del operador del láser, mientras que la clase IV puede causar un daño visual permanente y un daño significativo a la piel, así como incendiar algunos materiales [29].

2.3.3 Sensores de posición y navegación

Los dispositivos utilizados para determinar el posicionamiento y la orientación del sistema durante el levantamiento móvil cartográfico solos GPS, los GNSS (del inglés Global Navigation Satellite Systems) y las IMU. Existen diversos receptores GPS/GNSS que operan principalmente de tres formas: el modo dife-

rencial (DGPS, por su sigla en inglés), el RTK (del inglés Real Time Kinematic) y el PPK (del inglés Post Processed Kinematic) [17, 18]. La técnica DGPS requiere por lo menos cuatro satélites y de cálculo tridimensional, para que la precisión de los datos sea inferior al metro. Los receptores son de frecuencia individual, no requieren iniciar on the fly, y tienen estación base con servicios de corrección. Por el contrario, el RTK obtiene precisión centimétrica en movimiento, pero necesita cinco satélites para iniciar. La distancia entre los receptores base y rover no debe superar los 10 km. Además, los receptores deben tener doble frecuencia y la capacidad de iniciar on the fly. Por último, la técnica PPK obtiene datos de localización con precisión milimétrica, y utiliza una estación referencia para ajustar las coordenadas después del levantamiento, lo que permite un mayor radio de comunicación respecto de las otras técnicas [18].

Ahora bien, los GNSS son el principal componente de posicionamiento terrestre para los MMS [1, 48, 49]. Sin embargo, debido a las interrupciones originadas por los árboles, los edificios, los túneles, entre otros, debe funcionar en conjunto con las IMU, con el objetivo de mantener la comunicación entre el GNSS y el MMS.

Por otro lado, existen los IMU, que logran proporcionar información autónoma sobre la posición, velocidad y altitud del vehículo, cuando el sistema GNSS pierde conexión con los satélites. Hay tres tipos de IMU, los Ring Laser Gyros (RLG, por

su sigla en inglés) de alta precisión y elevado costo económico; los Fibre Optic Gyros (FOG, por su sigla en inglés), que se utilizan en la mayoría de aplicaciones y la precisión es aceptable para la cartografía móvil [13, 15, 50]; y los Micro Electronic Mechanical Systems (MEMS, por su sigla en inglés), que comparado con los anteriores es económico, pero cuenta con menos precisión para el posicionamiento terrestre. Normalmente, los IMU se componen de giroscopios posicionados en los tres diferentes ejes para detectar cambios en los ángulos de Euler, los acelerómetros que permiten medir el peso por unidad de masa conocido como fuerza-G y los magnetómetros, que son instrumentos para medir el tamaño y dirección de las fuerzas producidas por los campos magnéticos [8, 17, 18].

Adicionalmente, existe el sistema de orientación y posición (POS, por su sigla en inglés), que es un sistema compacto que utiliza la tecnología inercial integrada para generar soluciones de posicionamiento estables y fiables para MMS terrestres. También se puede usar con correcciones DGPS y RTK, la tecnología GNSS a nivel topográfico y el DMI para mejorar la precisión [51, 53]. Finalmente, los sistemas GNSS/IMU integran otro dispositivo para la medición de distancia denominado DMI. El DMI está compuesto por un codificador angular óptico que se usa en sistemas de alta velocidad y precisión, y está acoplado mediante un vástago a la rueda del vehículo. El DMI obtiene y transmite los datos relacionados con la rotación de la llanta para calcular la distancia recorrida por el vehículo.

2.3.4 Software

Los MMS requieren software especializados para el control del sistema y el posprocesamiento de las nubes de puntos. Para lo anterior, los fabricantes de escáner láser y empresas independientes desarrollan software con herramientas que permiten mayor versatilidad en el manejo de los datos, para suplir la demanda de la industria LiDAR y de cartografía.

Generalmente, el software incluye funcionalidades para la visualización, adquisición y edición de nube de puntos, como por ejemplo extraer mapas tridimensionales y perfiles, realizar cálculos de volumen y área o generar curvas de nivel y modelos digitales de terreno (DTM, por su sigla en inglés), entre otras [29, 54]. En la Figura 2, se muestra un ejemplo de nube de puntos adquirida con el TLS VZ-400 de Riegl y procesada en el software RiscanPro, de la empresa Riegl.



Figura 2. Nube de puntos captada y procesada por el grupo de investigación Geomática de la Universidad Industrial de Santander.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Software de las empresas fabricantes y proveedores

Fabricante/ proveedor	Software
Riegl	RiscanPro
Optech Inc.	Optech LMS Pro and ILRIS Scan
Leica	Leica Cyclone and CloudWorx
Topcon	Mobile Master Office
Trimble	Trimble Trident
Faro	Scene
MicroSurvey	MicroSurveyCAD 2016 Ultimate and Studio
Certainty3D	TopoDOT
Innovmetric	Polyworks
Carlson	Carlson Point Cloud
Cardinal Systems	VrLiDAR
Dynascan	Dynascan Software
Terrasolid	TerraScan/TerraModeler/ TerraMatch/TerraPhoto/ TerraSurvey

Fuente: Elaboración propia.

El software permite exportar los datos de nube de puntos a formatos compatibles con programas de diseño CAD. En la Tabla 3 se muestran algunos software especializados en la visualización, el análisis y el procesamiento de nube de puntos, desarrollados por el fabricante de escáner láser terrestre o proveedores de software para esta tecnología.

2.4 Fundamentos de diseño

Debido a la alta demanda en la adquisición de datos espaciales de manera eficiente y rentable, se inicia la implementación

de plataformas multisensor integradas, que han cambiado rápidamente los procesos en el diseño de sensores y de las telecomunicaciones en la ingeniería. Los sistemas multisensor se han convertido en una solución integral para la toma de datos en aplicaciones de cartografía y topografía. A continuación se presentan algunas directrices básicas para el diseño de MMS.

2.4.1 Posicionamiento y medición

Generalmente, los MMS requieren un sistema de coordenadas en el vehículo, en que es recomendable que el punto de origen se encuentre ubicado sobre el IMU, y los sensores de posicionamiento y medición deben estar referenciados con respecto a este sistema de coordenadas. Además, algunos MMS integran una segunda antena GPS para mejorar la precisión en la georreferenciación de los datos adquiridos; pero se debe tener en cuenta la separación entre antenas [2, 18]. Por lo tanto, si las antenas GPS y el IMU se fabrican por el mismo proveedor, el parámetro de separación entre antenas está incluido en las especificaciones técnicas del sistema, de lo contrario, esta separación puede ser calculada usando el software de adquisición de datos del GPS [18].

Ahorabien, el funcionamiento de los MMS radica en la correcta georreferenciación de todos los sensores de mapeo que estén integrados en la plataforma, y esto ocurre cuando la posición y orientación relativa se conoce respecto de un marco de referencia global. Por lo tanto, para determinar la posición y orientación de

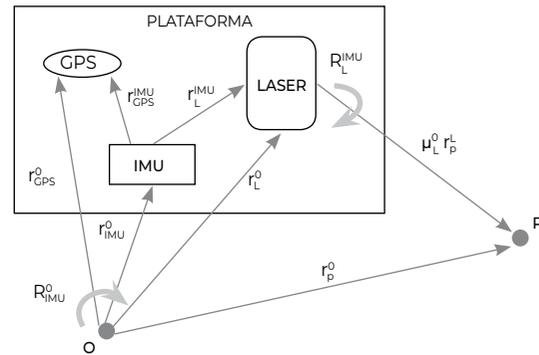


Figura 3. Concepto de georreferenciación [2, 55].

los puntos externos a la plataforma, se necesita de la georreferenciación de los sensores acoplados en la plataforma, como se muestra en la Figura 3. Este marco de referencia global es determinado por los operadores del MMS, durante el proceso de calibración del sistema [2, 55, 56].

La siguiente ecuación describe la forma para calcular las coordenadas de la posición y orientación de un punto externo a la plataforma [2, 3, 55].

$$r_p^o = r_{GPS}^o + R_{IMU}^o (r_L^{IMU} - r_{GPS}^{IMU} + \mu_L^o R_L^{IMU} r_p^L) \quad (3)$$

Donde la Tabla 4 resume la descripción de variables para la ecuación anterior.

Ahora bien, la precisión de los datos tridimensionales depende de la posición y la orientación del escáner láser durante el proceso de captación. Según Glennie (2007), citado por [57], los sistemas de navegación son los que tienen mayor fuente de error en los sistemas de escáner láser móvil, por las obstrucciones a las que está sometido el receptor GNSS en zonas urbanas, causadas principalmente

Tabla 4. Descripción de variable

Variable	Descripción
r_p^o	Vector posición del punto de interés desde el marco de referencia de mapeo
r_{GPS}^o	Vector posición de la antena GPS desde el marco de referencia de mapeo
R_{IMU}^o	Matriz de rotación entre el IMU y el marco de referencia de mapeo
r_L^{IMU}	Vector posición entre el LiDAR y el IMU
r_{GPS}^{IMU}	Vector posición entre el GPS y el IMU
m_L^o	Factor de escala desde el LiDAR al objeto en el espacio
R_L^{IMU}	Matriz de rotación entre el IMU y el LiDAR
r_p^L	Vector posición del punto de interés desde el LiDAR

Fuente: Elaboración propia.

por la infraestructura de los edificios, lo que interrumpe la señal y crea una geometría errónea por los pocos satélites detectados, y aunque la continuidad del posicionamiento puede compensarse temporalmente por el IMU, esta se degrada con el transcurrir del tiempo, por los errores en la alineación inicial de los ángulos roll, pitch y yaw, los errores del giroscopio y del acelerómetro, y durante el proceso del cálculo [57, 59]. Sin embargo, en 2012 se presenta un método para mejorar la precisión de los datos durante el escaneo láser móvil terrestre, lo que mitigó los errores de navegación y posicionamiento, mediante el diseño de un prototipo MMS [57].

Por otra parte, el DMI, ubicado en el centro de la rueda del vehículo, es el instrumento que mide la distancia

recorrida; pero es el punto de contacto de la rueda con el suelo el que se debe referenciar con respecto al IMU [18]. Otro componente fundamental es el escáner láser, que generalmente no se fabrica por el mismo proveedor del sistema, y la posición en el vehículo depende de la configuración del soporte.

2.4.2 Soporte

La plataforma es indispensable en cualquier MMS para lograr una correcta disposición de los sensores, teniendo en cuenta sus limitaciones funcionales. Normalmente el soporte junto con los dispositivos se encuentran ubicados en la parte superior del vehículo terrestre. En general los LiDAR, cuando adquieren los datos, tienen un campo de visión determinado, que se debe considerar en el momento de diseñar el soporte, para aprovechar al máximo la cobertura y la funcionalidad del escáner láser [30].

3. Sistemas, proveedores y tendencias

En diferentes países, la captación de imágenes panorámicas georreferenciadas y la reconstrucción tridimensional de la infraestructura vial y las edificaciones ha promovido el desarrollo de soluciones integrales de sistemas de mapeo móvil a nivel comercial, y prototipos desarrollados principalmente en universidades por la comunidad científica en diferentes áreas del conocimiento.

3.1 Sistemas comerciales

Existen diversas soluciones MMS integrales, como el IP-S3 HD1 de Topcon, el

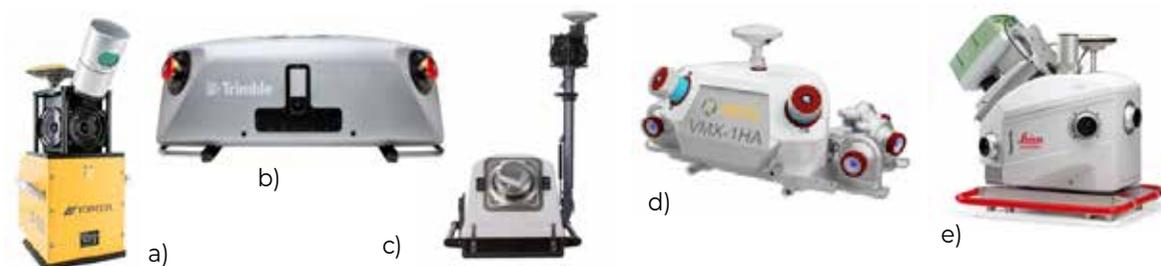


Figura 4. Sistemas de mapeo móvil comerciales, a) Topcon IP-S3 HD1 [44], b) Trimble MX8 [40], c) Optech Lynx SG-S [41], d) Riegl VMX-1HA [42], e) Leica Pegasus two [45].

Tabla 5. Soluciones MMS comerciales

Empresa	Nombre	Descripción
Topcon, Japón [44]	IP-S3 HD1	<ul style="list-style-type: none"> ○ Escáner láser ○ Cámara esférica CCD ○ Receptor GNSS ○ IMU ○ DMI
Trimble, EE.UU. [40]	MX8	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2 escáneres láser (VQ-250/VQ-450) ○ 2 cámaras + 1 opcional panorámica ○ GNSS (POS LV 420 o POS LV 520) ○ DMI
Optech, Canadá [41]	Lynx SG-S	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1 láser escáner ○ Cámara esférica (Ladybug 3 o Ladybug 5) ○ GPS
Leica, Suiza [45]	Pegasus two	<ul style="list-style-type: none"> ○ Escáner láser ○ 8 cámaras CCD ○ GNSS ○ IMU ○ DMI (opcional)
Riegl, Austria [42]	VMX-1HA	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2 escáner láser ○ 6 cámaras CS6 (opcional Ladybug 5 o Nikon D810) ○ GNSS ○ IMU ○ DMI
IGI mbH, Alemania [60]	StreetMapper	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2 escáneres láser ○ 1 cámara ○ DGPS ○ IMU
Mitsubishi Electric Corporation [61]	MMS-X640	<ul style="list-style-type: none"> ○ 4 escáneres ○ 6 cámaras ○ GPS ○ IMU ○ Odómetro

Fuente: Elaboración propia.

MX8 de Trimble, el Lynx SG-S de Optech, el VMX-1HA de Riegl o el Pegasus Two de Leica, entre otros. En la Figura 4, se muestran estas configuraciones comerciales.

Estas soluciones integrales permiten una adaptación y acople sencillo de los dispositivos en la parte superior de un vehículo. La Tabla 5 resume los principales componentes de cada solución comercial de MMS de diversas empresas.

Las empresas Optech y Suneco desarrollan un MMS que denominan ILRIS-CM (del inglés Intelligent Laser Ranking and Imaging System - Motion Compensation). El sistema consiste en la integración tecnológica de un escáner láser terrestre ILRIS-3D y un Applanix POS LV, basado en vehículos terrestres y los receptores GPS. Estos componentes se acoplan fácilmente en un vehículo. Las pruebas se realizan en una mina de tajo abierta a lo largo de una carretera, para generar un cálculo del volumen de excavación, en que se captan millones de puntos con resolución de 0.1 m, en un rango de cobertura de 0.3 km², a una velocidad de 5 km/h, y los datos se procesan en oficina mediante el software PolyWorks [5].

En la última década, surge el MMS llamado Trident-3D, desarrollado por la empresa Geo-3D, para obtener el inventario de la infraestructura vial. El sistema tiene dos componentes principales: el sistema de captación de imágenes georreferenciadas y el módulo para extraer los objetos, y determinar la posición en el entorno escaneado [16, 17, 62].

3.2 Sistemas prototipo

En 2009, surge el prototipo de un sistema de escaneo láser llamado LARA 3D, con base en los estudios realizados desde el año 2003 por el laboratorio de robótica (CAOR) de París. LARA 3D está compuesto por un receptor GPS AgGPS132 de Trimble, una unidad de medición inercial Vg600 o IMU440 y dos odómetros acoplados en las ruedas de una furgoneta. Adicionalmente, cuenta con 2 escáneres láser SICK-LMS-221 que tienen un campo de visión de 180° y se ubican de forma paralela para obtener una cobertura de 360°. Además, tiene acopladas dos cámaras Canon EOS 5D. Estos sensores están ubicados a 3.1 m sobre el suelo. El sistema tiene una precisión de 0.3 m, pero la resolución de la nube de puntos es limitada [57].

En 2010, De Agostino, Lingua y Piras [48] realizan el sistema SOLDEO para captar datos tridimensionales, basados en los estudios previos realizados por el grupo de investigación Geomática del Politécnico de Turín. El sistema está compuesto por una plataforma integrada GPS/IMU (Xsens MTi-G), una cámara web (Logitech QuickCam Pro 9000), un escáner láser LMS-110 y tres receptores GNSS geodésico Leica GX1230. A pesar del extenso proceso de calibración para la puesta en marcha del sistema, SOLDEO permite una correcta representación tridimensional del entorno y la facilidad de uso mediante equipos de cómputo de rendimiento medio por parte de usuarios no calificados.

El Road Scanner surge principalmente para realizar inventarios viales detallados

en acuerdo con la ley italiana D.M. de 2001. El MMS se desarrolla por la compañía italiana SITECO, en colaboración con las universidades de Parma y Bolonia. Este sistema incluye 8 cámaras de 1 megapíxel de marca BASLER SCOUT, distribuidas en diferente dirección en la parte delantera y superior de un vehículo, para brindar una visión completa de la carretera y adaptarse a los requisitos de una determinada aplicación. Respecto de la navegación y el posicionamiento, el MMS integra un sistema LANDINS suministrado por la compañía IXSEA, que está compuesto por un GNSS BD-960 y un receptor Trimble AG332, que opera con la constelación satelital GLONASS y la técnica RTK. Además, incluye un DMI marca BEI-HS35, ubicado dentro de la rueda del vehículo para obtener una precisión de 1 mm en la medición de distancias. Por último, se acopla un escáner láser FARO PHOTON 120 con una frecuencia de 976,000 puntos por segundo y un sistema integrador Applanix POSLV 220, para la georreferenciación de todos los datos obtenidos [49] and it has to regard all problems linked to the project phase and the connections with many other works like railways, bus-lines and, specially for an ancient city like Bologna, historical buildings. For these reasons the Municipality of Bologna has committed the ultimate design of the underground line with a high standard level of precision; this aspect forces the Project Group to choose a survey method that has to be both accurate and not too expensive. In order to achieve a precise high resolution survey in a short time, a Mobile Mapping System vehicle has been

used. The Road-Scanner system is equipped with 2GPS+IMU sensors for navigation (Applanix POSLV).

En Colombia, el grupo de investigación Geomática de la Universidad Industrial de Santander proyecta integrar la tecnología LiDAR con cámaras de visión esférica y los sensores de posición y navegación, para implementar un MMS sobre un vehículo terrestre. Para esto cuenta principalmente con dos escáneres láser terrestre VZ-400 de Riegl, que captan millones de puntos con una precisión de 3 mm; un sistema de orientación y posición LV 510 de Applanix, que opera a velocidades normales de tráfico; un receptor GNSS GR-5 de Topcon, que utiliza la navegación cinética satelital; una cámara Ladybug 3 de PointGrey, que capta imágenes 360° de 12 MP y un portátil robusto B300 de Getac con pantalla táctil de 1400 nits. Una muestra de estos instrumentos se presenta en la Figura 5.



Figura 5. Componentes para un prototipo MMS proyectado, a) Cámara Ladybug 3 y GNSS GR-5, b) Escáner láser TLS VZ-400, c) POS LV 510, d) Portátil Getac B300

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Proveedores de servicios

Empresa (año)	País	MMS	MLS	Plataforma	URL
TELE ATLAS (1984) adquirida por TOMTOM (2008)	Países Bajos	Tele Atlas vans	SICK LMS 291	Terrestre	http://www.tomtom.com/en_gb/licensing
NAVTEQ (1987) adquirida por NOKIA (2007)	EE.UU.	—	VELOCITYNE HDL-32E	Terrestre	https://company.here.com/here
COWI (1930)	Suecia	—	Leica ALS80	Aéreo	http://www.cowi.com/
IGI mbH	Alemania	StreetMapper 360	Riegl VQ-250	Terrestre	http://www.igi-systems.com/index.php
Position Partners (2008)	Australia	—	Topcon IP-S3	Terrestre	http://www.positionpartners.com.au
Topconsolutions	EE.UU.	—	Topcon IP-S3 HD1	Terrestre	http://www.topconsolutions.com
Haefeli-Lysnar	Australia	—	Trimble MX8	Terrestre	http://www.hlgs.com.au
MTZ Martínez Geospatial (1974)	EE.UU.	—	Optech Lynx SG	Terrestre	http://www.mtzgeo.com
Mason Digital Mapping (1971)	RU	—	Leica C10	Terrestre	http://www.mason.co.uk
Gorronzona & Associates (1990)	EE.UU.	—	Leica Pegasus two	Terrestre	http://ga-inc.net
Quantum 3D Mapping (1991)	República Checa	—	Optech Lynx SG	Terrestre	http://www.quantum3d.cz
Facet Technology Corporation (1999)	EE.UU.	Mobile 360	—	Terrestre	http://facet-tech.com
Omnicom Engineering (por más de 20 años)	RU	OmniSurveyor 3D	Z + F Profiler 9012	Terrestre	http://omnicomengineering.co.uk
GeoAutomation (2007)	Bélgica	Geo Automation 3D	—	Terrestre	http://www.geoautomation.com
Mandli (1983)	EE.UU.	Maverick	Velodyne HDL-32E	Terrestre	http://mandli.com
Transmap Corporation (1994)	EE.UU.	ON-SIGHT	Velodyne PUCK (VLP-16)	Terrestre	http://www.transmap.com
Siteco (1995)	Italia	Road-Scanner 4	Faro Focus 3D	Terrestre	http://www.sitecoinf.it/index.php/en

3.3 Proveedores de servicios

Debido al amplio campo de acción de los MMS, las empresas privadas han encontrado un gran atractivo económico ofreciendo este tipo de tecnología. En consecuencia, numerosas empresas han logrado establecerse en el mercado, y han brindado servicios de mapeo móvil en diferentes plataformas, para estudios en diversos escenarios, a precios asequibles. Cabe aclarar que las compañías listadas en la Tabla 6 no son todas las compañías existentes en el mundo, y son seleccionadas por incorporar la tecnología LiDAR.

La tecnología MMS es ampliamente usada en aplicaciones relacionadas con estudios de infraestructura e inventarios viales, por la facilidad de obtener datos en movimiento sin detener el tráfico vehicular [19]. Un ejemplo de las soluciones MMS para estudios de grandes distancias en carretera es el StreetMapper, que utiliza dos escáneres láser Riegl 2D, integrado con un sistema GPS/INS de IGI TerraControl, que se seleccionó por la capacidad de mantener la exactitud de posición de los datos durante 120 s de desconexión del GPS con los satélites. Esta solución de gran rendimiento ha logrado una exactitud posicional de menos de 30 mm, con buenas condiciones de conexión del GPS [15].

En el caso de estudios en lugares subterráneos, como túneles o minas, la organización CSIRO (del inglés Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) ha desarrollado

un MMS capaz de obtener nubes de puntos georreferenciadas en este tipo de ambientes. Sus principales componentes son un láser SICK LMS291, montado sobre una base que gira a 2 rpm, que permite una visión semiesférica tridimensional. Adicionalmente, tiene dos escáneres láser ubicados en direcciones opuestas sobre un plano vertical, para obtener una visión de 360°. Por último, el sistema tiene un IMU industrial MicroStrain 3DM-GX2. Los resultados de los mapeos son precisos y más eficientes que los métodos usados anteriormente para el levantamiento cartográfico y topográfico en ambientes subterráneos [63].

En ese mismo sentido, el mapeo de cuevas se ha llevado a cabo por medio de brújulas, inclinómetros y cinta métrica de fibra de vidrio que dificulta el movimiento continuo y aumenta el tiempo del levantamiento de datos. Sin embargo, el desarrollo de tecnología LiDAR compacta y robusta ha permitido la producción de MMS portables, livianos y fáciles de transportar, como por ejemplo el Zebedee, que consiste en un láser Hokuyo UTM-30LX y un IMU industrial MicroStrain 3DM-GX3, que proporcionan las mediciones de las velocidades y aceleraciones angulares durante el trayecto. El IMU contiene un magnetómetro triaxial, que contribuye en entornos con interferencia magnética mínima. Por último, se utiliza un software de procesamiento para integrar los datos del LiDAR con las mediciones inerciales del IMU, con el fin de estimar la trayectoria del escáner [64].

Por otra parte, una aplicación importante es la seguridad en el espacio aéreo, por medio de la integración de los MMS en vehículos aerotransportados. La Administración Federal de Aviación (FAA, por su sigla en inglés) es la agencia de aviación de los Estados Unidos, con facultades para regular todos los aspectos de la aviación civil de América y la seguridad aérea. Por lo anterior, los datos georreferenciados obtenidos con la tecnología LiDAR en plataformas aéreas permiten la localización de obstáculos en el espacio aéreo y el entorno de las pistas de aterrizaje, y contribuye con información para la toma de decisiones de los controladores de vuelo [65]. Adicionalmente, los MMS, integradas con los UAV, permiten el mapeo de zonas aéreas de difícil acceso, de forma rápida y precisa, y contribuyen a los inventarios forestales, a la agricultura de precisión, a la inspección de líneas eléctricas e infraestructura vial, a la topografía de minas a cielo abierto, a la arqueología, y al patrimonio cultural, entre otros [1].

La tecnología SLAM se utiliza ampliamente en robots autónomos que integran sensores con LiDAR, odómetros y radares, con el fin de elaborar un modelo del entorno. Generalmente, el SLAM se utiliza en escenarios cerrados para aprovechar su autonomía respecto de los errores de localización de los GPS en este tipo de entornos. La tecnología SLAM se basa en crear modelos coherentes con el ambiente, y ejecutar algoritmos en tiempo real con loop closure, para interpretar los datos y

representar la topología verdadera del entorno [66]. Un ejemplo del uso de esta tecnología es la aspiradora inteligente Vacuum 2, de la empresa china Xiaomi, que cuenta con un láser que escanea los 360° a una tasa de 1,800 veces por segundo, 3 procesadores para analizar los algoritmos de localización cartográfica del SLAM, radar ultrasónico y compatibilidad con los sistemas operativos para móviles Android e iOS.

En Colombia se han desarrollado diversos sistemas de mapeo móvil basados en tecnología LiDAR con la integración de sensores para la georreferenciación. Sin embargo, se encuentra encaminada a cumplir un factor importante en la nueva tecnología SLAM, por sus características de alta precisión y velocidad de obtención de datos. La Universidad Nacional de Colombia desarrolló un robot móvil experimental llamado AGV-UN que utiliza el láser SICK LMS102 junto con tecnología SLAM, con el objetivo de reconstruir y explorar entornos desconocidos de manera autónoma [67]. También se encuentra un robot móvil autónomo basado en integración sensorial denominado EKF-SLAM desarrollado en la Universidad del Valle, que integra un robot Pioneer 3-DX, codificadores para la medición de velocidades y desplazamientos del robot, sonares y un láser SICK LMS 200 [68].

4. Conclusiones

Los avances de nuevas soluciones MMS se orientan a una adquisición de datos de manera rápida, precisa, eficiente y

oportuna mediante montajes ligeros, en que el esfuerzo humano es cada vez menor, lo que permite agilizar los procesos durante el levantamiento de campo en diversos escenarios.

Los MMS evolucionan por las diversas tecnologías incorporadas, y tienden a usarse en cualquier escenario, con sensores eficientes y de menor tamaño, que permiten disminuir costos en la implementación.

El desarrollo acelerado de la tecnología LiDAR y el uso de sensores cada vez más pequeños y livianos, soportados en plataformas como backpack o aviones no tripulados, permiten llevar a cabo estudios en ambientes cerrados o de difícil acceso, y generan soluciones integrales MMS que tienden a ser más portátiles.

Las entidades gubernamentales encargadas de la gestión de la infraestructura vial, de edificaciones, y de la movilidad pueden utilizar la tecnología reciente de los sistemas de mapeo móvil para disminuir costos de levantamientos de información en campo y optimizar los tiempos para el diagnóstico de vías y planificación urbana.

Las plataformas multisensor, específicamente de la integración de imágenes digitales, navegación y posición, y de tecnología LiDAR, se ha desarrollado principalmente en la academia, lo que ha permitido suplir necesidades en la industria de la cartografía y la topografía.

Los esfuerzos en investigación para automatizar la adquisición de datos espaciales a nivel de calle han llevado al

desarrollo de sistemas de mapeo móvil portátil en que se destaca la integración de sistemas de posicionamiento de alta precisión, escáner láser con tecnología LiDAR y cámaras digitales. Se infiere que para la navegación virtual los desarrolladores han optado por adquirir imágenes digitales mediante cámaras con visión de 360°.

Los datos que obtiene los MMS, junto con el procesamiento, proporcionan datos tridimensionales precisos y de alta resolución, que pueden aplicarse en la ingeniería civil, la ingeniería forestal, la ingeniería de transporte o la ingeniería urbanística, entre otras.

El avance de las técnicas de posicionamiento y el uso IMU y DMI permiten mejorar la precisión de los sistemas de navegación global y, por consiguiente, de las soluciones MMS.

Agradecimientos

Esta investigación fue apoyada por el grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. Los autores agradecemos especialmente al Doctor Jhon Jairo Cáceres Jiménez por las directrices técnicas aportadas respecto de los temas de sensores remotos y teledetección.

Referencias

- [1] Amon, P., Riegl, U., Rieger, P., Pfennigbauer, M., Laser, R., & Systems, M. (2015). *UAV-based laser scanning*

- to meet special challenges in lidar surveying.* In *Geomatics Indaba Proceedings*, 138–147.
- [2] El-Sheimy, C., & Ellum, N. (2002). Land-Based Mobile Mapping Systems, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68 (1) January, 13–17.
- [3] El-Sheimy, N. (1996). A Mobile Multi-Sensor System for GIS Applications in Urban Centres, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 26, B2, 95–100.
- [4] Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Chen, Y. (2012). Multiplatform mobile laser scanning: Usability and performance, *Sensors (Switzerland)*, 12, 9, 11712–11733.
- [5] Optech, & Suneco. La plataforma móvil terrestre LIDAR, IMU y GPS, Consultado 27 Agosto 2016, en: <http://sitio.cartografia.cl/la-plataforma-movil-terrestre-lidar-imu-y-gps>
- [6] Phoenix Aerial Systems. Introducing the AL3 S1000+ Copter, Consultado 13 Junio 2016, en: <http://www.phoenix-aerial.com/products/aerial-lidar-systems/s1000-copter-for-the-al3/>
- [7] Talaya, J., Bosch, E., Alamús, R., Serra, A., & Baron, A. (2000). "GEOVAN: The Mobile Mapping System from the ICC". En: *Proceedings of the 4th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, Kunming, 1–7.
- [8] Tao, C. V. (2000). Mobile mapping technology for road network data acquisition, *Journal of Geospatial Engineering*, 2, 2, 1–14.
- [9] Transportation research Board. (2004). "Automated pavement distress collection techniques". En: *Transporta, Washington, D.C.*, M. Townes Ed., 334.
- [10] El-Sheimy, N. (1996). A Mobile Multi-Sensor System for GIS Applications in Urban Centres. *ISPRS Archives*, 31, B2, 95–100.
- [11] He, G., Novak, K., & Feng, W. (1993). On the Integrated Calibration of a Digital Stereo-Vision System, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29, 139–139.
- [12] Tao, C. V., Chapman, M. a., & Chaplin, B. a. (2001). Automated processing of mobile mapping image sequences, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55, 330–346.
- [13] Alamús, R., Baron, A., Casacuberta, J., Pla, M., Sánchez, S., Serra, A., & Talaya, J. (2005). "Geomobil: lcc Land Based Mobile Mapping System for Cartographic Data Capture". En: *International Cartographic Conference*, Coruña (España), 1–9.
- [14] Elphel, I. *Eyesis4Pi Stereophotogrammetric camera*, Consultado 5 marzo 2016, en: <http://www3.elphel.com/eyesis-4pi>
- [15] Hunter, G., Cox, C., & Kremer, J. (2006). Development of a Commercial Laser Scanning Mobile Mapping System – StreetMapper, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1–4.
- [16] LLC, C. & A. (2015). Roadway and Roadside Visual Image and Attri-

- bute Data Collection and Distribution. En: http://www.dot.ca.gov/newtech/researchreports/preliminary_investigations/docs/roadway_imaging_preliminary_investigation_03-24-15.pdf
- [17] Petrie, G. (2010). Mobile Mapping Systems: An Introduction to the Technology Geoinformatics, *Geoinformatics*, 13, 32–43.
- [18] Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., & Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 46, 7, 2127–2145.
- [19] Puente, I., González, J., Arias, P., & Armesto, J. (2011). Land-Based Mobile Laser Scanning Systems: a Review, *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 38, 5, 163–168.
- [20] Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.
- [21] López Carlos & Dominio M. (2015). Aplicaciones a la prospección y explotación de recursos minerales, Los Drones y sus aplicaciones a la Ingeniería Civil, Capítulo 6, 77–94.
- [22] Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review, *Applied Geomatics*, 6, 1, 1–15.
- [23] Petrie, G., & Toth, C. K. (2008). *Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning, En: Topographic Laser Ranging and Scanning, CRC Publicación*, 1–27.
- [24] Obadayah Foord. (2015). Integrity monitoring the islands of the Hampton Roads Bridge Tunnel involves combining hydrographic survey, lidar, shoreline survey, and terrestrial lidar survey, *XYHT Magazine*, October, 7.
- [25] Leica Geosystems. Leica Pegasus: Two Wearable Mobile Mapping Solution, Consultado 12 Abril 2016, en: <http://leica-geosystems.com/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus-backpack>
- [26] Kaartinen, H., Zanetti, M., & Louis, S. (2015). “Backpack personal laser scanning system for grain-scale topographic mapping”. En: 46th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas: USRA, 7–8.
- [27] Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Chen, Y. (2012). Multiplatform Approach To Mobile Laser Scanning, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, B5, 483–488.
- [28] Porras H. Caceres J. Gallo O. (2012). Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre, *Tecnura*, 18(41), 134–153.
- [29] Fernandez Diaz, J. C. (2007). Scientific Applications of the Mobile Terrestrial

- Laser Scanner System. Universidad de Florida.
- [30] Yadav, M., Goel, S., & Singh, A. K. (2014). Developing Basic Design and Mathematical Framework for a Mobile Mapping System — a Case Study Using Available Sensors, *Indian Society of Remote Sensing*, 42, June, 301–310.
- [31] Yu, S.-J. (2005). Digitizing & 3D Modeling of Road Surface using an Integrated Multisensory. University of Tennessee. Knoxville.
- [32] Al-Hamad, A., Moussa, A. & El-Sheimy, N. (2014). Video-based Mobile Mapping System Using Smartphones, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1, November, 13–18.
- [33] Miller, B. (1965). Laser altimeter may aid photo mapping. *Aviation Week & Space Technology*, 88, (13), 60-65.
- [34] Shepherd, E. Colston. (1965). Laser to watch height, *New Scientist*, 26, 437, 33.
- [35] Shan, J., Toth, C., & Petrie, G. (2009). *Topographic Laser Ranging And Scanning - Principles and Processing*. CRC Press, 2, 5, 336-338.
- [36] Lidar, V. High Definition LiDAR HDL-32E, Consultado 13 Marzo 2016, en: http://velodynelidar.com/lidar/hdl/products/97-0038d_HDL-32E_datasheet.pdf
- [37] Trimble. Trimble AX80, Consultado 3 Junio 2016, en: <http://www.trimble.com/imaging/ax80.aspx?tab=Applications>
- [38] Noventa, L. (2014). Futuro seguro del almacenamiento de datos, *GIM International*, 1(3), 1–36.
- [39] Riegl. RIEGL RiCOPTER with RIEGL VUX -1 integrated, Consultado 16 Abril 2016, en: http://www.riegl.com/fileadmin/user_upload/Datasheets/ULS/RiCOPTER_at_a_glance_2015-03-31.pdf
- [40] Trimble. Trimble MX8 Mobile Spatial Imaging, Consultado 5 Mayo 2016, en: https://www.trimble.com/imaging/pdf/Trimble_MX8_Datasheet.pdf
- [41] Optech I. Lynx SG-S Mobile Survey System, Consultado 23 Septiembre 2015, en: <http://www.teledyneoptech.com/wp-content/uploads/Lynx-Specsheet-SGS-150911-WEB.pdf>
- [42] Riegl. N. E. W. VMX -1HA, Consultado 5 Mayo 2016, en: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VMX-1HA_at-a-glance_2016-09-16_A4.pdf
- [43] Topcon. IP-S2 3D mobile mapping system, Consultado 3 Junio 2015, en: http://www.topconpositioning.de/sites/default/files/product_files/brochure_topcon_ip-s2_compact_en.pdf
- [44] Topcon. IP-S3 HD1, Consultado 23 Septiembre 2015, en: http://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/IP-S3_HD1_E.pdf
- [45] Leica Geosystems. Leica Pegasus: Two Mobile Mapping Solution, Consultado 29 Abril 2015, en: <http://leica-geosystems.com/products/mobi>

- le-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus_two
- [46] Cambridge in Colour. Understanding Digital Camera Sensors. Consultado 4 junio 2016, en: <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-sensors.htm>
- [47] Litwiller, D. (2001). CCD vs. CMOS, *Photonics Spectra*, 35, 1, 154–158.
- [48] Agostino, M. D. E., Lingua, A., & Piras, M. (2012). “SOLDEO: a New Solution for 3D GIS Data Recording”. En: *TS08H - 3D Principles and Technology*, Roma, 6089, 1–13.
- [49] Gandolfi, S., Barbarella, M., Ronci, E., & Burchi, A. (2008). Close photogrammetry and laser scanning using a mobile mapping system for the high detailed survey of a high density urban area, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 909–914.
- [50] Jaakkola, A., Hyypä, J., Kukko, A., Yu, X., Kaartinen, H., Lehtomäki, M., & Lin, Y. (2010). A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65 (6), 514–522.
- [51] Applanix. POS LV, Consultado 18 Diciembre 2015, en: https://www.applanix.com/pdf/specs/POSLV_Specifications_dec_2015.pdf
- [52] Lithopoulos, E., Reid, D. B., & Scherzinger, B. (1996). The position and orientation system (POS) for survey applications, *ISPRS Intl. Archives of Photogram. and Remote Sensing*, 31, B3, 467–471.
- [53] Mostafa, M., & Hutton, J. (2001). “Direct positioning and orientation systems: How do they work? What is the attainable accuracy”. En: *Proceedings, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Meeting*, 11.
- [54] Ulloa Moreno, A. J. (2013). Evaluación del uso de un escáner láser terrestre y métodos tradicionales en la ejecución de un levantamiento topográfico. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [55] Schwarz, K. P., & El-Sheimy, N. (2004). Mobile Mapping Systems—State of the art and future trends, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35, B, 10.
- [56] Toth, C. K. (2009). “R&d of Mobile Lidar Mapping and Future Trends”. En: *ASPRS 2009 Annual Conference*, Baltimore, Maryland, 7.
- [57] Poreba, M., & Goulette, F. (2012). Assessing the Accuracy of Land-Based Mobile Laser Scanning Data, *Geomatics and Environmental Engineering*, 6(3), 73–81.
- [58] López Valdés, E., Amparo Núñez, A., & Gracia Gómez, C. (2010). *Test de análisis de la precisión en determinación de trayectorias con GPS*. Escola Politecnica Superior d'Edificació de Barcelona, España.
- [59] Mateo, J., & Lozano del Pozo, C. (2014). *Comparativa con técnicas GNSS y Mobile Mapping de un inventario*

- de elementos físicos y geométricos. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- [60] IGI, 3d Laser Mapping. The world's most accurate mobile laser mapping system with 360-degree vision. Consultado 09 Agosto 2017, en: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dlm/downloads/brochures/StreetMapperBrochure_v2.pdf
- [61] Mitsubishi. Mobile Mapping System Mitsubishi, Consultado 3 Junio 2015, en: <http://www.mitsubishielectric.com/bu/mms/catalog/index.html>
- [62] Laflamme, C., Kingston, T., & Mccuaig, R. (2006). "Automated Mobile Mapping for Asset Managers Automated Mobile Mapping for Asset Managers". En: *XXIII FIG Congress*. Munich, Germany.
- [63] Zlot, R., & Bosse, M. (2014). Efficient large-scale three-dimensional mobile mapping for underground mines, *Journal of Field Robotics*, 31, 731–752.
- [64] Zlot, R., & Bosse, M. (2014). Three-Dimensional Mobile Mapping of Caves, *Journal of Cave and Karst Studies*, 76 (3), 191–206.
- [65] Gutelius, B. (2012). Airborne LIDAR for Obstruction Mapping: Enabling Flight Safety, *LIDAR Magazine*, 2, (1), 1–5.
- [66] Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J. J., Leonard, J. J. (2016). Past, Present and Future of Simultaneous Localisation and Mapping: Toward the Robust Perception Age. *IEEE Transaction on Robotics*, 32 (6), 1309–1332.
- [67] Velásquez, C., Chávez, J. & Córdoba, E. (2015). "Implementación de sistema de navegación autónomo en robot móvil experimental para reconstrucción y exploración de entornos desconocidos" En: *Memorias IV Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica y Automatización - CIIMA*. 72–84.
- [68] Berrío, J. (2012). *Mapeo y localización simultánea de un robot móvil en ambientes estructurados basado en integración sensorial*. Universidad del Valle, Valle del Cauca, Colombia.