

ARTÍCULO MONOGRÁFICO

Uso de tecnología LiDAR en la evaluación de proyectos viales*

[Use of LiDAR technology in the evaluation of road projects]

**IVÁN DARÍO GÓMEZ-BETANCOURT¹, MAURICIO GÓMEZ-BETANCOURT²,
LUIS MARCIAL BERTEL-PATERNINA³**

RECIBO: 21.10.2009 - AJUSTE: 04.11.2009 - AJUSTE: 19.02.2010 - APROBACIÓN: 08.03.2010

Resumen

Se plantea la creciente necesidad de obtener cartografía con altos estándares de calidad para la evaluación de todo tipo de proyectos de ingeniería e investigación, presentando la tecnología LiDAR como una opción para la consecución de estos resultados, exponiendo las bases que fundamentan su funcionamiento, componentes, técnicas y métodos que la apoyan, ventajas, resultados y aplicación de los mismos.

También se mencionan los campos de aplicación de esta tecnología y se explica específicamente cual es la metodología para los proyectos de infraestructura vial. Al final del documento se presentan las ventajas de la tecnología LiDAR y su aplicación en la evaluación de proyectos viales, basado en experiencias adquiridas en proyectos recientes en Brasil y Colombia. Por último se hace una breve comparación con otros métodos para realizar levantamientos topográficos.

* Modelo para citación de este artículo:

GÓMEZ BETANCOURT, Iván Darío; GÓMEZ BETANCOURT, Mauricio y BERTEL PATERNINA, Luis Marcial (2010). Uso de tecnología LiDAR en la evaluación de proyectos viales. En: Ventana Informática. No. 23 (jul.-dic., 2010). Manizales (Colombia): Universidad de Manizales. p. 51-70. ISSN: 0123-9678

- 1 Ingeniero Topográfico; Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Asesor Técnico, PROGEN, Projetos Gerenciamento e Engenharia Ltda., Sucursal Argentina. Neuquén (Argentina). Correo electrónico: ivan.dario@progen.com.br
- 2 Ingeniero Topográfico; Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Instructor Área de Topografía, Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA. Cali (Colombia). Correo electrónico: mauricio680@hotmail.com
- 3 Ingeniero de Electricista; Especialista en Redes y Telecomunicaciones. Docente, Facultad de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Manizales. Manizales (Colombia). Correo electrónico: lbertel@umanizales.edu.co

Palabras clave: *LiDAR, Laser, Modelos digitales de terreno, Sensores remotos, Topografía.*

Abstract

The article states the increasing need of having cartography with high quality standards for the evaluation of every kind of engineering and research projects, showing the LiDAR technology as an option for the execution of those results, showing the basis of how this technology operates, its components, techniques and methods that support it, advantages, results and applications of the results.

Subsequently it's mention the application fields of this technology and it's explained specifically the methodology for road infrastructure projects. At the end of the document, the advantages of the LiDAR technology are exhibit, and its application on road infrastructure projects, based of acquired experiences on recent projects in Brazil and Colombia; ending with a short comparison with other methods to execute topographic measures.

Keywords: *LiDAR, Laser, Terrain Models, Remote Sensors, Topography.*

Introducción

Según Fricker, et al (2002, 1), el disponer de cartografía cada vez más precisa y actualizada es una necesidad de la sociedad actual, la cartografía se presenta como una herramienta básica para la planificación y gestión del territorio, esto conlleva un importante esfuerzo por parte tanto del gobierno, empresas e investigadores del sector. Afortunadamente, día a día van apareciendo más herramientas que permiten aumentar tanto el rendimiento como la propia calidad de los trabajos realizados. En esta línea se pueden señalar dos herramientas que, sin duda, desempeñarán un importante papel en un futuro muy cercano en la generación de MDT (modelos digitales del terreno) y orto-fotografías, como son la utilización de sensores digitales y de sistemas de altimetría láser (LiDAR).

Considerando los métodos fotogramétricos como una tecnología madura, el LiDAR es una tecnología en continuo desarrollo. Éste se dirige hacia un procesamiento automatizado y robusto de los datos, minimizando el control manual.

Gómez, Delgado y Pérez (2005) definen esta tecnología como un sistema complejo, compuesto por un emisor/receptor y un escáner láser

muy potente, un receptor GPS que proporciona la posición y la altura del avión en cada momento, y un sistema inercial (IMU) que informa de los giros del avión y de su trayectoria. El elemento principal de un sistema LiDAR es el escáner láser, que va aerotransportado y emite pulsos de luz infrarroja que servirán para determinar la distancia entre el sensor y los puntos del terreno.

Una vez realizado el trabajo de campo, «el resultado bruto es una *nube de puntos*. La clasificación de estos en función del cuerpo en que ha impactado el haz láser es un proceso desarrollado de forma específica para esta tecnología. En cambio la generación de un modelo digital de elevaciones (MDE) no es un procedimiento exclusivo de esta tecnología. Los modelos digitales del terreno (MDT) o modelos digitales de superficie (MDS) son el producto final del levantamiento» (Ibáñez, et al., 2007).

Recientemente, proyectos viales como el Corredor Interoceánico Sur – Perú/Brasil, con una longitud total de 703 kilómetros y la Ruta del Sol en Colombia (Ministerio de Transporte, s.f.) con un total de 1071 kilómetros, hicieron uso de esta tecnología a lo largo de sus procesos de evaluación y diseños, obteniendo resultados óptimos para los objetivos planteados, principalmente en el tema de la precisión.

El objetivo general de esta monografía es la descripción de esta tecnología, las diferencias que presenta con sus similares y como es su aplicación en la evaluación de proyectos viales.

1. Altimetría Láser –LiDAR

1.1 Definición

Fricker, et al (2002, 4) precisa la palabra LiDAR como el acrónimo de los términos *Light Detection And Ranging*, traducido al español como, detección y medición por luz. Esta técnica que originalmente era utilizada con fines militares, en la actualidad se convierte en una técnica alternativa a las técnicas topográficas y fotogramétricas para la generación de MDE de gran densidad y precisión.

Una observación importante concluye que «las principales características de un conjunto de puntos realizados con esta tecnología son su alto número y su gran homogeneidad espacial, la gran desventaja es identificar el cuerpo sobre el que impacta; por esta razón se acompaña la toma de datos LiDAR con la adquisición de imágenes del área levantada. En el proceso de generación del MDT (que es el producto final) la nube de puntos generada debe ser clasificada para preservar las

entidades útiles en la función de cada modelo digital de elevaciones» (Ibáñez, et al., 2007, 7)

Es así como experiencias actuales, permiten asegurar que «con los sistemas comerciales actuales, se pueden capturar datos a más de 1000 puntos/seg; así una hora de vuelo proporciona más de 10.000.000 de puntos, que permiten la generación de MDE de elevada precisión (espaciado del orden del metro). Como mínimo un MDT LiDAR es tres veces más denso que un MDT fotogramétrico, además es importante tener en cuenta que es posible cubrir un área de 1000 Km² en un tiempo inferior a 12 horas obteniéndose un MDE final al día siguiente con más de 40.000.000 de puntos -más de 40000 puntos/Km²-; Si se trata de un trabajo lineal se puede realizar el MDE de una banda 500 Km de longitud en una mañana estando los resultados preparados al día siguiente.

La precisión de la medida dependerá evidentemente de los tres elementos básicos del sistema: el LiDAR, el GPS (*Global Positioning System*) y el IMU (*Inertial Measurement Unit*), así la precisión de las medidas estará muy influenciada por los errores del IMU y del ángulo de barrido sobre todo para alturas de vuelo grandes, mientras que los errores del GPS están más influenciados por la distancia a la estación base de referencia. En la figura (figura 1) se muestra la precisión del sistema para diferentes condiciones de trabajo» (Fricker, et al., 2002, 6)

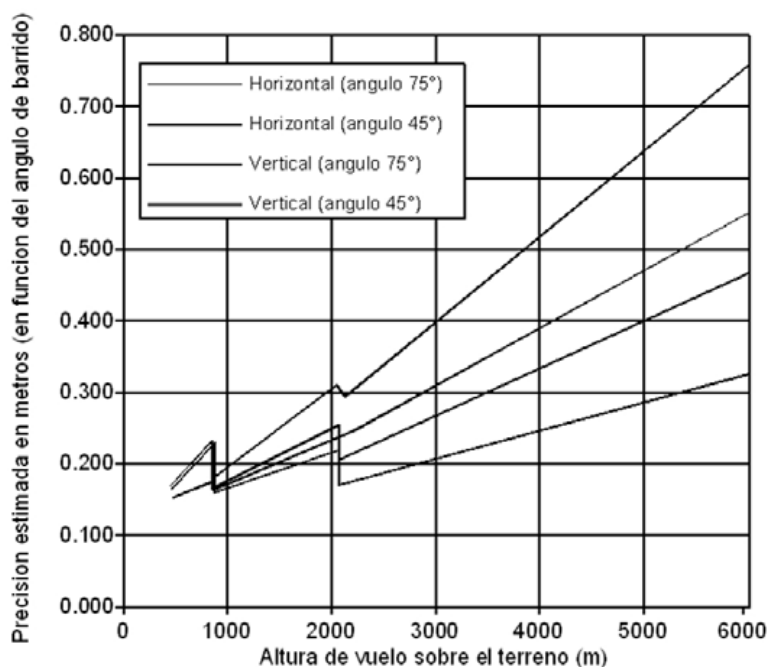


Figura 1. Precisiones plani-altimétricas estimadas con el sistema LiDAR para diferentes alturas de vuelo sobre el terreno (Roth, 2001, citado por Fricker, et al, 2002, 6)

«Las alturas de vuelo se encuentran entre 500 y 3000 m. Esto se debe a que la precisión de cada punto LiDAR depende de la huella del haz láser sobre el objeto. La precisión vertical es de 2 a 5 veces mejor que la planimétrica, al contrario del resto de tecnologías (fotogrametría, SAR-InSAR)» (Ibáñez, et al., 2007, 7)

Se deduce de la figura 1 que «las precisiones dependen fundamentalmente de la altura de vuelo sobre el terreno, aunque se pueden indicar como valores representativos una precisión absoluta altimétrica de 15 cm (relativa superior a 5 cm) y planimétrica en torno a 20-30 cms. Otro aspecto clave de los sistemas LiDAR es que se trata de sensores activos, frente a las cámaras fotogramétricas o sensores ópticos aerotransportados, esto trae consigo importantes ventajas como la posibilidad de penetración a través de las hojas de los árboles en las zonas boscosas» (Fricker, et al., 2002, 7)

1.2 Aplicaciones

Una descripción adecuada de las aplicaciones del sistema LiDAR es la realizada por Flood (1999) y recopilada por Fricker, et al (2002, 7-8):

1.2.1 Generación de MDE. Es un sistema con un elevado rendimiento y rentabilidad para la captura de datos de elevaciones para la generación de MDE permitiendo una alta precisión y densidad de información, reduciendo el coste de ejecución.

1.2.2 Recursos forestales. Es uno de los primeros campos en los que se investigó la aplicación de estas técnicas; mediante el empleo de las técnicas de altimetría láser es posible obtener de una forma precisa la topografía tanto del terreno como las cubiertas vegetales en función de los retornos del láser dentro de los trabajos de post-proceso de los datos; esto es una peculiaridad de estos sistemas por lo que los sistemas de altimetría láser aerotransportada es una técnica de gran interés para la gestión de recursos forestales.

1.2.3 Generación de modelos tridimensionales urbanos. Considerado como uno de los campos de mayor interés en la Cartografía actual, la dinámica física y económica de las zonas urbanas requiere disponer de manera apremiante de una cartografía precisa y actualizada; los modelos digitales de superficie de las ciudades tienen diversas aplicaciones entre las que se pueden indicar las telecomunicaciones (telefonía móvil), los modelos atmosféricos, la planificación de riesgos ambientales, sin olvidar, la propia gestión de tipo urbanístico.

1.2.4 Cartografía de riesgos de avenidas torrenciales e inundaciones. El empleo de estos sistemas permite la generación de cartografías

rápidas y precisas de las zonas susceptibles a sufrir inundaciones, aspecto básico para la planificación, la valoración de riesgos, e incluso, para la valoración en caso de una catástrofe.

1.2.5 Cartografía de elementos lineales. El sistema de láser aero-transportado permite disponer de MDE de corredores lineales con una gran rapidez y efectividad, este tipo de cartografía es muy frecuente para el diseño y ejecución de vías de comunicación, trasvases y conducciones de gas.

1.2.6 Cartografías de zonas de acceso complejo. En numerosos casos es necesario disponer de información de zonas de interés medio-ambiental pero de complicado acceso terrestre (zonas pantanosas, con gran vegetación, escarpadas, sin una existente red vial entre otras) en las que la aplicación de las técnicas fotogramétricas o topográficas es compleja, en estos casos la aplicación de sistemas LiDAR presenta importantes ventajas; Esta tecnología también puede ser aplicada a zonas en las que existen depósitos de residuos tóxicos o industriales que impiden el acceso de personal.

1.2.7 Cartografía de zonas costeras. La aplicación a las zonas costera proporciona importantes ventajas con respecto a las técnicas fotogramétricas, en particular, para el control y la monitorización de zonas especialmente dinámicas y de escasa textura de imagen, como, por ejemplo, línea de costa y dunas.

1.2.8 Planificación de auxilio y ayuda en el caso de desastres naturales. Los principales desastres naturales, como, los huracanes, inundaciones, avalanchas, maremotos y los terremotos pueden llegar a introducir importantes cambios que deben ser considerados en la planificación y ayuda a los afectados, para ello es necesario disponer de una cartografía rápida y precisa de las zonas afectadas que puede ser obtenida mediante la utilización de los sistemas láser.

1.3 Equipo y funcionamiento

Ibáñez (2007, 8) precisa que el sistema de LiDAR consiste esencialmente en un sensor láser instalado en una plataforma aérea que barre las superficies que se encuentran entre el sensor y el terreno obteniendo una nube de puntos de coordenadas precisas; el equipo está compuesto por un sensor láser, un sistema inercial de navegación (INS) y un receptor GPS en una plataforma, en tierra se dispone una red GPS para trabajar de forma conjunta con el receptor GPS de la plataforma. La disposición de estos elementos se muestra en la figura 2.

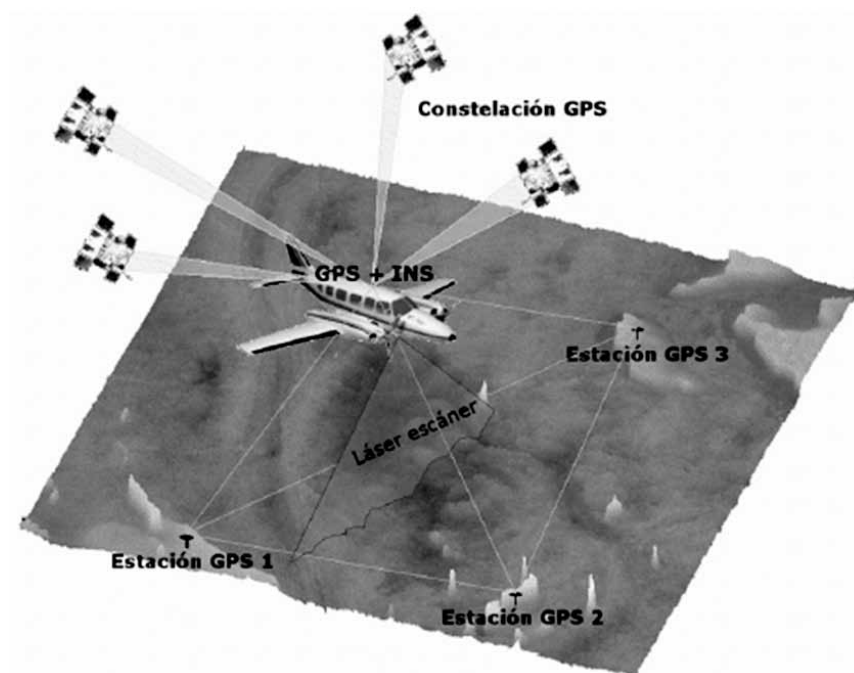


Figura 2. Elementos del sistema LiDAR Aerotransportado. (Ibáñez, 2009)

En la figura 3 se muestran los principales componentes del sistema LiDAR, se distinguen: el sensor láser, la cámara digital, el controlador (controla al sensor y almacena los datos) y un computador portátil para seguir el plan de vuelo. La descripción de estos elementos realizada por Ibáñez (2007, 9-13) es muy clara:

1.3.1 «Sensor Láser. El sensor láser mide las distancias de la plataforma al terreno. Existen multitud de configuraciones del sensor, empezando por el modo de trabajo del láser empleado, que puede ser de pulso (envía pulsos a intervalos regulares de tiempo) o de onda continua; otro parámetro que define el funcionamiento del sensor es la trayectoria que describe sobre el terreno la señal reflejada por la óptica de salida del sensor láser, esta puede ser en forma de Z o de U (para el caso de láser de pulso con un espejo oscilante) o de lazos encadenados (láser de onda continua).

El sensor receptor de la señal se encuentra solidario al emisor, este mide la potencia de retorno de la señal de modo continuo, se identifican los picos de energía como retornos, cada sistema registra distintos retornos (figura 4). Algunos registran solo el último pulso, otros los tres primeros y el último, otros solo el primero y el último; según la aplicación se requiere una u otra configuración. El cociente de la potencia de

pico recibida y la emitida es la reflectancia; esta es función del cuerpo en que se ha reflejado el haz láser, siendo menor para cuerpos más oscuros, así con una reflectancia normalizada ($[0:1]$) si el objetivo es un suelo con césped el retorno se encuentra alrededor de 0.7 mientras que sobre el asfalto no supera valores de 0.3.



Figura 3. Componentes del sistema LiDAR

1.3.2 Sistema de Navegación Inercial (INS). El sistema orienta la plataforma tomando como punto fijo la posición de la antena GPS; la unidad que realiza esta función es la unidad inercial (IMU), la cual determina los tres movimientos principales: giro, alabeo, y cabeceo, estos permiten dar coordenadas al centro óptico del sensor láser, relacionando los orígenes de coordenadas GPS y del láser.

El sistema está compuesto en general por tres acelerómetros y giróscopos dispuestos en las tres direcciones del espacio, los datos obtenidos son las aceleraciones en las tres direcciones del espacio y las variacio-

nes angulares. Procesando esta información se obtienen los tres giros entre el origen del GPS y el origen del láser.

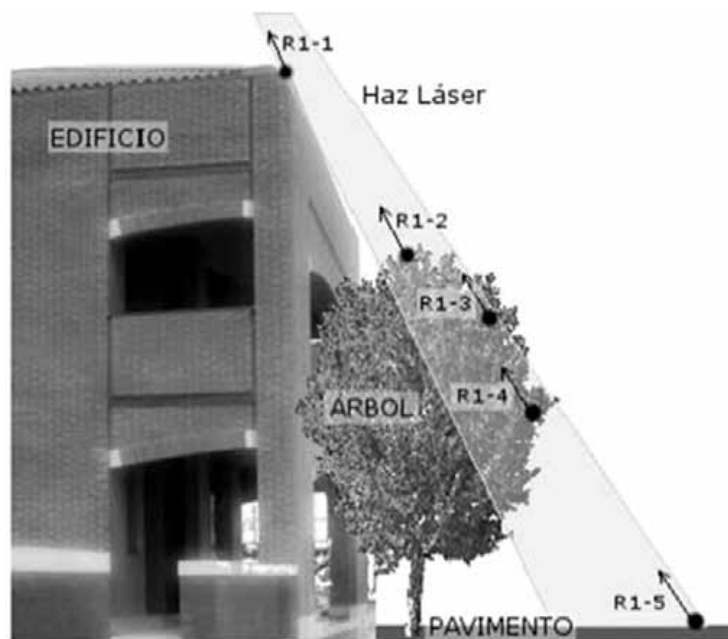


Figura 4. Retorno de la señal del sistema LiDAR. (Ibáñez, 2009)

Su mejor emplazamiento es el más cercano posible al origen del sensor láser, disminuir la distancia entre el origen de la unidad inercial y el del sensor láser mejora la calibración (correcciones para alinear los ejes de los distintos sistemas) del sistema.

1.3.3 Sistema GPS. El objetivo de este sistema es determinar la posición de la plataforma. Para alcanzar las máximas precisiones en el avión se sitúa un receptor GPS doble frecuencia, mientras que en tierra se establece una red que realiza una observación simultánea con el medio móvil.

La frecuencia del sistema varía entre 1Hz y 2Hz, los sistemas disponibles trabajan en tiempo real y/o en pos proceso; las precisiones en ambos sistemas son entre 30 cm. y 3 m., y de 10 cm. a 15 cm, en pos proceso se obtienen precisiones de hasta 5 cm.

En el modo de trabajo en pos proceso es necesario establecer una red GPS en tierra, se recomienda usar más de una estación con una línea base máxima de 20 km, aunque algunos fabricantes de software de pos proceso recomiendan líneas base inferiores a 10 km; No se recomienda trabajar con un número de satélites igual o inferior a 5 y un PDOP (*Position Dilution Of Precision*) <3.

1.3.4 Integración sistemas Láser – INS / GPS. Los tres sistemas, ya descritos, se integran en la plataforma, actualmente las antenas GPS no requieren ninguna orientación.

El sensor láser se instala con el sistema de referencia orientado según la dirección de vuelo (eje x) y con el eje Z hacia los objetos escaneados (parte inferior del avión), adicionalmente al sistema, se instala una cámara digital o de video para tener información visual del área levantada por el sensor láser, esta información es de gran utilidad en el pos proceso, en la fase de clasificación de puntos.

Con todo este proceso se consigue obtener las coordenadas de la superficie levantada, la nube de puntos obtenida contiene toda la información de los elementos que se encontraban durante el levantamiento entre el sensor y el terreno; así la nube de puntos, además del terreno, contiene otra información: edificios, vegetación, vehículos, etc.» (Ibáñez, et al., 2007, 8-13).

«La calibración debe realizarse para ajustar los errores sistemáticos producidos por la disposición de los equipos en la plataforma, y los errores de alineación de la unidad IMU y del sensor láser. Los vectores que relacionan los tres orígenes pueden calcularse en tierra y en reposo de forma sencilla; en tierra también puede calibrarse el error de medida del sensor láser (calibración pre-vuelo). Para ajustar las desalineaciones angulares de los sistemas de referencia de la unidad inercial y el sensor láser deben ajustarse en movimiento sobre áreas de control; para ello se usan superficies elevadas y horizontales de grandes dimensiones. Típicamente se usa algún edificio con tejado horizontal, con los lados de la fachada perpendiculares entre sí, a esta calibración se la denomina post-vuelo.

Otro elemento a calibrar son los relojes de los diferentes sensores, el receptor GPS funciona con el tiempo GPS, mientras que el sensor láser y la IMU con la unidad controladora del sistema aerotransportado; el procedimiento se basa en usar el tiempo GPS como referencia e interpolar el resto de posiciones» (Martínez, 2008).

Esto permite asegurar que «los sistemas de altimetría láser actuales son la unión de tres tecnologías que actualmente están en un estado evolutivo maduro: Los sistemas de distanciometría láser (LiDAR), los sistemas de posicionamiento global mediante satélite (GNSS) y los sistemas de referencia inercial de alta precisión (IMU). Dichos sistemas requieren la utilización de un avión similar al empleado para la toma de fotografías aéreas. Asimismo, comparte con la fotogrametría el diseño

del plan de vuelo ejecutando pasadas paralelas y perpendiculares, siendo básico un buen diseño para el éxito de la operación (básico debido a su menor ángulo de campo). Pero a diferencia de la fotografía aérea, como sensor activo es posible realizar captura de datos sin tener en cuenta la iluminación solar, aunque deban evitarse la realización de vuelos en condiciones de vientos fuertes, nevada, lluvia, niebla, elevada humedad o nubes debido a la influencia que tienen en la medida de la distancia recorrida por el rayo láser» (Fricker, et al., 2002, 5).

2. Aplicación en la evaluación de proyectos viales

Considerando la premisa de que el componente más importante en temas de costos de un proyecto vial de gran envergadura son los movimientos de tierra, es de vital importancia contar con un insumo que garantice obtener el mayor grado de confiabilidad en el cálculo de estos valores, es allí donde la aplicación de la tecnología LiDAR juega un papel preponderante cuando se trate de realizar la ingeniería básica de un proyecto vial.

2.1 Planificación del vuelo

Según Ibáñez (2007, 14), en la planificación del levantamiento, atendiendo a la precisión requerida, se diseñan los parámetros de vuelo. Se obtienen también las pasadas a realizar para cubrir la zona de trabajo con un área de traslape que asegure la calidad del proceso de homogeneización (unión de las líneas de levantamiento). Para obtener un control sobre los resultados se planifican pasadas perpendiculares a las planeadas en sentidos opuestos.

Fricker (2002, 6) recomienda evitar la realización de vuelos cuando el suelo esté cubierto de nieve o tenga un elevado nivel de humedad debido a que reduce considerablemente la reflectividad del suelo.

Dependiendo de la zona y el tipo de producto especificado por el cliente, se debe llevar a cabo la ubicación de los aeropuertos, hoteles y lugares para el despliegue de puestos de control, que son esenciales para la logística y la adquisición de datos de vuelo y trabajo de campo.

Basándose en las características del producto se establece el plan de vuelo, asegurando la total cobertura de la zona de interés, que ayudara al operador y al piloto a sobrevolar el área determinada para el proyecto. Herramientas gratuitas como *Google Earth* o *GvSIG* facilitan en la actualidad la correcta planificación de esta actividad (figura 5).

2.2 Ejecución del levantamiento

Utilizando el procedimiento ya descrito y aplicándolo al tema específico de proyectos viales, los parámetros recomendables para esta actividad se encuentran en la tabla 1.



Figura 5. Líneas de vuelo visualizadas en Google Earth Proyecto Ruta del Sol. Colombia

Tabla 1. Parámetros de vuelo LiDAR

Parámetro	Medida
Altura del vuelo	1500 metros
Ancho de la faja de barrido	800 metros
Velocidad media	150km/h
Tipo de aeronave	Avión
Ángulo de escaneo	20°
Sobre posición longitudinal (traslape)	30%
Puntos/m2 de adquisición	1

3. Procesamiento de la información

3.1 Extracción de datos

En la extracción de datos, toda la información del láser, fotos digitales y archivos del GPS se convierten de formato RAW a los formatos que se utilizarán más adelante. Obtenidas las coordenadas de las medidas láser registradas por el sensor referidas a la pasada en que se han levantado, el proceso de ajuste / homogenización unifica las pasadas y permite obtener las coordenadas de todas las franjas del levantamiento en un solo sistema de referencia.

La primera fase de la extracción de datos es una combinación de datos GPS de la aeronave con los GPS de campo (bases de apoyo), este proceso se realiza comúnmente en software como *PosPacMMS* (Applanix Corp., 2009) y tiene como objetivo definir la ruta realizada por la aeronave.

Éste es un aspecto externo a la tecnología, pero necesario a la práctica, para obtener el producto final, la nube de puntos procesada tiene el *datum* del sistema GPS (WGS-84); sin embargo, si se desea obtener las coordenadas en otro sistema es necesaria una transformación.

Por ser un sistema basado en GPS las alturas medidas serán elipsoidales. Debe disponerse de un geoide para poder pasar a alturas ortométricas, un modelo geoidal global no tiene la precisión necesaria (como el EGM96); en Colombia se dispone del modelo geoidal GEOCOL 2004, que es el modelo de geoide asociado al datum MAGNA-SIRGAS, adoptado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi según el parágrafo 2 de la resolución 068 de enero 28 de 2005. (IGAC, 2005)

Ibáñez (2007, 17) concluye que la precisión (en el área de trabajo) puede ser mejorada si se obtiene un ajuste local de estos geoides (se pasa de una precisión métrica/decimétrica a centimétrica). Para ello se debe disponer de la cota ortométrica en los vértices de la red GPS. La poca densidad de estos datos obliga en la mayoría de los casos a realizar medidas de campo con métodos topográficos clásicos y gravimétricos.

La segunda etapa es la extracción de datos desde el láser, generalmente se realiza en software como DashMap (en el caso de los sensores de la marca OPTECH), este proceso apunta a georreferenciar la nube de puntos.

En la tercera fase se extraen de las fotografías de formato RAW en formato TIFF para ser utilizados posteriormente para generar las ortofotos; antes de la extracción de las imágenes es necesario igualar el contraste y la gama tonal de todas las imágenes.

En esta etapa del procesamiento, según Ibáñez (2007, 15), las coordenadas de los puntos ya son definitivas (X, Y, Z), la nube de puntos contiene información de todos los cuerpos que se encontraban en el momento del levantamiento en la trayectoria del sensor; para derivar un modelo se clasifican y preservan solo los puntos que definen las características necesarias. Así, si el modelo está destinado a una aplicación forestal, la masa debe ser preservada; en cambio, si la aplicación es hidráulica las masas arbóreas deben ser eliminadas de la nube de puntos. Para el caso de proyectos viales, se preservan los diferentes tipos de terreno que se verán a continuación.

3.2 Tratamiento de los datos

Para la fase de procesamiento de datos está muy expandido el uso del software *TerraSolid* (Terrasolid, 2010) que funciona sobre Microstation SE (Bentley Systems, 2010), este se lleva a cabo en una secuencia lógica de pasos:

- Clasificación / filtrado,
- Generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE),
- Ortorectificación, y
- Vectorización.

A continuación se describen brevemente cada uno de los pasos.

3.2.1 Clasificación de la nube de puntos. «Esta es la parte del proceso de derivación de un modelo con datos LiDAR más importante para obtener un buen producto y es donde se han centrado grandes esfuerzos en los últimos años.

Una definición detallada de cada característica del terreno se hace necesaria para realizar este proceso, las siguientes definiciones se encuentran en Sithole (2003):

- Terreno. Se entiende por terreno la superficie con todas sus características preservadas.
- Terreno desnudo. Es estrictamente la superficie del terreno con alguna característica delgada preservada (por ejemplo asfalto).
- Objeto. Vegetación y elementos insertados en el territorio por la mano humana.
- Objeto desenlazado. Objetos esencialmente verticales por todos sus lados (p.ej. edificaciones, árboles).
- Objeto enlazado. Tiene alguna de sus facetas verticales, pero otras no (p.ej. puentes, pasarelas).
- Puntos falsos. Puntos mal clasificados que introducen errores en el modelo. Pueden ser Altos (debidos a elementos como líneas eléctricas, pájaros,...) o bajos (errores).

Existe una gran cantidad de filtros que realizan este proceso, su comportamiento se clasifica por el concepto del filtro; también se pueden clasificar por cómo estructuran los datos, según cómo realizan el análisis de proximidad, cómo miden las discontinuidades, si iteran o realizan el proceso en un solo paso, si eliminan los puntos descartados o modifican su z, y por si son capaces de integrar más información que el último pulso (primer pulso, reflectancia)» (Ibáñez, et al., 2007, 15-16).

Para el proceso de clasificación es muy importante elegir los parámetros correctos, si no los obstáculos como edificios y la vegetación se clasificarán como suelo y crearán una representación deficiente de la tierra.

3.2.2 Generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE). «Se entiende como MDE la representación cartográfica ordenada de elevaciones del terreno; cuando se refiere a una superficie continua (pendientes, orientaciones) y se denomina Modelo Digital del Terreno (MDT), cuando se han preservado las características enlazadas al terreno el resultado es un modelo digital de superficie (MDS).

Se debe considerar que la precisión de un punto es distinta que la del modelo, ya que a causa de la densidad de puntos LiDAR la interpolación del modelo está minimizando la influencia de los errores altimétricos de la nube de puntos.

Algunos algoritmos usan los métodos estadísticos como la predicción lineal para suavizar los resultados de la nube de puntos clasificados como terreno desnudo, con esto se limita los efectos de puntos falsos bajos no filtrados (estos son errores del sistema que generan puntos falsos que están por debajo del terreno real). Este proceso se describe en Kraus (2001)» (Ibáñez, et al., 2007, 17-18).

De este producto se obtiene el insumo más importante para el diseñador vial, el cual consiste en la topografía del terreno representada por curvas de nivel, estas pueden ser generadas en el intervalo que se requiera, teniendo en cuenta que la precisión en elevaciones ya mencionada es del orden de 15 centímetros. Por lo general, se trabaja con curvas de nivel cada 1 metro (Figura 6).

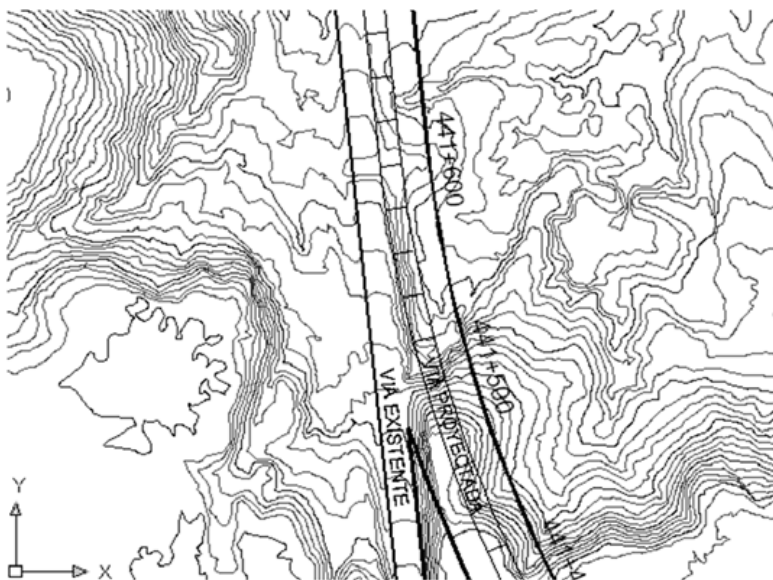


Figura 6. Diseño Geométrico sobre topografía generada con LiDAR. Proyecto Ruta del Sol. Colombia.

3.2.3 Ortorectificación. Para realizar la *ortorectificación* de las imágenes se utilizan los siguientes insumos:

- Modelo digital de elevaciones.
- Fotografías digitales.
- Trayectoria de la aeronave.

Basado en el modelo digital de elevaciones generado por la nube de puntos, la información de la trayectoria de la aeronave y la información del sistema inercial se inicia el proceso de *ortorectificación*, este proceso es completamente digital, lo que no ocurre cuando los datos se adquieren y se procesan con una cámara analógica.

Con esta información, el software realiza el mosaico de las fotografías necesarias para el recubrimiento de la superficie de interés, permitiendo al operador definir los puntos homólogos entre escenas, que se utilizarán para la triangulación de imágenes y el ajuste de las mismas para llegar a la exactitud esperada.

El proceso de *ortorectificación* es semi-automático, pues son necesarias intervenciones del operador hasta que el error existente en el proceso de triangulación sea menor que el coeficiente predeterminado; el error aceptable es determinado por la regla siguiente: *Error < tamaño de píxel de Ortofoto (cm) x 4*.

Este parámetro asegura la calidad de la *ortorectificación*. También en esta fase se define el tamaño de píxel de la *ortofoto* el cual afecta a la identificación de los objetos en el suelo; un píxel de 30 centímetros, por ejemplo, permite la observación y medición de obstáculos de dos metros cuadrados.

En la evaluación de un proyecto vial este insumo es de vital importancia, gracias a la utilización de *ortofotos* es posible evitar la afectación de cultivos, predios, líneas de energía, etc., al momento de definir el trazado, también posibilita al diseñador el planteamiento de variantes adecuadas en el paso por poblaciones, disminuyendo en tiempo y costo el proyecto a materializar (figura 7).

A diferencia de la fotografía aérea convencional, las *ortofotos* en el sistema láser no tienen por objeto generar curvas de nivel, ya que para generarlas se usa el modelo digital de elevaciones del terreno a partir del LiDAR tal como se enunció anteriormente. Las *ortofotos* de uso comercial tienen una resolución espacial de 30 cm y vienen en formato GeoTIFF, pueden ser visualizadas en cualquier software de imágenes o se importan como referencia externa en software como AutoCAD, MicroStation, entre otros.

3.2.4 Vectorización. Utilizando los puntos de láser, las *ortofotos* y las curvas de nivel generadas por el MDT, se identifican puntos notables de la superficie, que son representadas en forma vectorial y se asignan a sus respectivas clases (hidrografía, vías de acceso, edificaciones, etc.).

Los archivos de curvas de nivel y vectorización de los elementos notables de interés se desarrollan y se almacenan en formato CAD (dwg, dxf, dgn). Siempre existe la preocupación de que estos archivos ocupen gran espacio en disco y obstaculicen el funcionamiento de los programas de diseño geométrico, por lo general, este tipo de levantamientos se divide en tramos para evitar este inconveniente.



Figura 7. Diseño Geométrico sobre ortofotos. Proyecto Ruta del Sol. Colombia.

4. Comparación con otras tecnologías

Los elementos más importantes para el uso de determinada tecnología son la precisión obtenida, rendimiento y costos. Si se realiza un levantamiento topográfico con los métodos tradicionales (estación total) se pueden obtener precisiones máximas de 1: 50000, rendimientos promedio de un kilómetro diario con franjas de 100 metros y levantando puntos con cuadrículas de aproximadamente 20 metros de lado con costos relativamente bajos (considerando una comisión de topografía- basado en experiencias propias de los autores).

Según Guerra (2004, 1), la interferometría SAR, es una tecnología que permite la detección de deformaciones del terreno con una precisión subcentimétrica sobre imágenes de satélite de 100 * 100 Km, con un tamaño de pixel de 50m. Bajo condiciones favorables, con dos imágenes es posible obtener una medida de hundimiento del terreno cada 50 m con precisión centimétrica (es decir cuadrícula de 50 metros de lado).

Teniendo en cuenta los factores anteriores la tecnología que podría compararse con el LiDAR es la fotogrametría, pero en ella es necesario contar con otros factores como la luz solar, condiciones de visibilidad del terreno, etc., además de requerir una resolución determinada y con ella se obtendría una densidad de puntos inferior a la obtenida con el LiDAR.

Mientras para Maune (2001) el LiDAR es más eficiente que la fotogrametría para extensiones entre 130 km² y 1300 Km²; y los estudios realizados por Norheim et al (2002), también confirman que, en general, los DTM derivados de LiDAR son más precisos, con menos prejuicios y menos varianza; Baran (2009), considera que tanto LiDAR como InSAR (Figura 8) son sensores activos que transmiten pulsos de energía electromagnética y graban la señal de retro dispersión para obtener la ubicación espacial de los objetivo de la medición.

Las celdas de muestreo InSAR contiene muchos datos individuales (volumen) que se dispersan en el suelo y arriba de este. Esto con frecuencia introduce sesgos no deseados. La longitud de onda larga del sistema de InSAR ofrece su mayor ventaja, ya que puede penetrar a través de las nubes, niebla y polvo. Esto significa que InSAR puede funcionar prácticamente en todas las condiciones meteorológicas.

El procesamiento de datos InSAR parece más complejo que LiDAR, a pesar de que esta tecnología es relativamente bien desarrollada y los algoritmos de procesamiento son muy robustos. El tratamiento de los datos de InSAR requiere un software altamente sofisticado y como con LiDAR el procesamiento de datos debe ser realizado por personal entrenado.

Las dos técnicas de reconocimiento aéreo, considera Baran (2009), en general se complementan entre sí.

LiDAR es la tecnología preferida en la parte alta de la escala de precisión: para aplicaciones de ingeniería, los volúmenes de movimiento de tierras, estudios de drenaje, donde las formas del terreno localizado, la penetración de la vegetación y alto grado de la fiabilidad es necesario.

InSAR es la tecnología preferida en el extremo inferior de la escala de precisión: para aplicaciones topográficas, los programas nacionales de

cartografía, conceptual, la planificación, donde la alta fiabilidad de altura del terreno no es justificada por costo muy grande zonas.

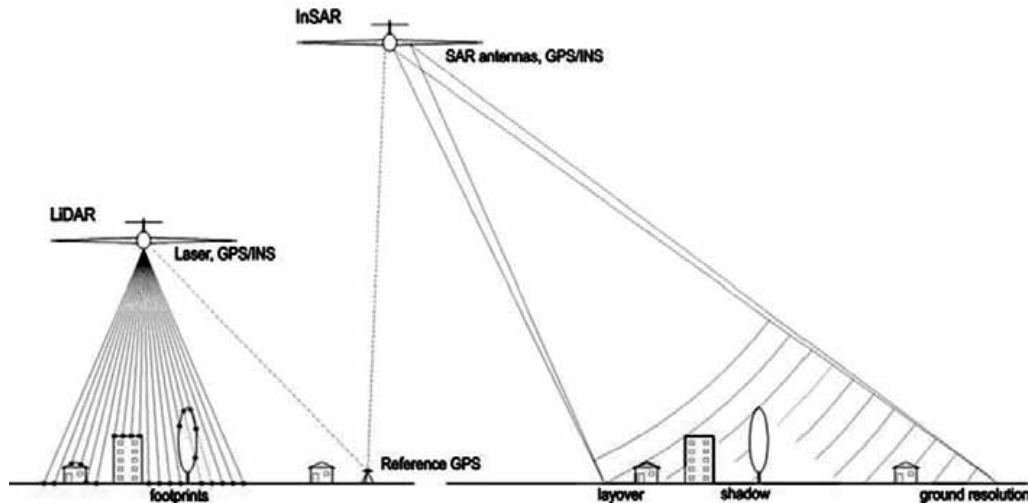


Figura 8.(A) LiDAR y (B) InSAR Geometría Básica de Adquisición.

5. Conclusiones

- La productividad de esta tecnología es muy elevada, la experiencia refleja que se pueden realizar levantamientos LiDAR incluyendo ortofotos en el equivalente al 5% del tiempo en que se pueden realizar con topografía convencional. El número de puntos por hectárea también es muy superior para el LiDAR siendo del orden de 1800 puntos por hectárea (después del filtrado de terreno) contra apenas 130 puntos.
- En términos de costos, la tecnología LiDAR presenta un valor muy competitivo en términos de densidad de puntos por área de terreno, solamente en proyectos que cubren grandes extensiones. El costo es muy elevado cuando se trata de áreas pequeñas.
- Debido en parte a los costos, hay pocos sensores disponibles en el mercado. Por otro lado, los procesos de filtrado de la nube de puntos aun no están completamente desarrollados y por lo tanto requieren de constante supervisión. Esto incrementa bastante los costos de producción.
- Relativo a la accesibilidad al terreno, esta tecnología presenta también una ventaja considerable frente a las otras tecnologías, ya que se pueden obtener datos del terreno desnudo aun en zonas

selváticas donde otras tecnologías dejarían vacíos de información creando la necesidad de realizar procedimientos o trabajos de campo adicionales.

Bibliografía

- APPLANIX CORP. (2009). POSPac Mobile Mapping suite [en línea]. Richmond Hill (Ontario, Canada): Applanix Corp. <<http://www.applanix.com/products/airborne/pospac-mms.html>> [consulta: 10/02/2010]
- BARAN, Ireneus (2009). Airborne InSAR and LiDAR Compared. [en línea]. Sydney (Australia): AAMHatch. <http://www.aamhatch.com/resources/pdf/publications/technical_papers/Airborne%20InSAR%20and%20LiDAR%20Compared_June2009.pdf> [consulta: 15/10/2009]
- BENTLEY SYSTEMS (2010). MicroStation Platform Technology and Products [en línea]. Exton (PA, USA): Bentley Systems. <<http://www.bentley.com/en-US/Products/MicroStation+Product+Line/>> [consulta: 10/02/2010]
- FELICÍSIMO, A.M. (1999). Modelos digitales del terreno [en línea]. Oviedo (España): Universidad de Oviedo, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. <<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/CursoMDT/CursoMDT.html>> [Consulta:20/09/2009].
- FRICKER, P.; GERVAIX, F.; ROTH, R.; LLORENS, P; DELGADO, J. y CARDENAL, J. (2002). Utilización de sensores aerotransportados para la generación de MDT y orto fotografías: LH DS40 y LH ALS40 [en línea]. En: XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Ingegraf'2002. Santander (España). (5-7/06/2002). Santander (España): Universidad de Cantabria. <http://www.topografiaglobal.com.ar/archivos/teoria/sa_ads40als40.pdf> 10 p. [consulta: 15/10/2009]
- GÓMEZ, Alfonso; DELGADO, Jorge y PÉREZ, Núria (2005). Obtención de DTM Y DSM mediante tecnología LiDAR. Aplicación al Río Ebro. [en línea]. En: XVII Congreso Internacional INGEGRAF XV ADM. Sevilla (España). (01-03/06/2005). Sevilla (España): Universidad de Sevilla. <<http://www.ingegraf.es/pdf/titulos/COMUNICACIONES%20ACEPTADAS/T14.pdf>> [consulta: 15/10/2009]
- IBÁÑEZ MARTÍNEZ, Enric. (2008). Generación de modelos digitales del terreno (DTM) con laser escáner aerotransportado (ALS /LiDAR).Barcelona (España): Universitat Politècnica de Catalunya.
- IBÁÑEZ, Enric, GILI, Josep A., DOLZ RIPOLLÉS, Josep y BAYÁN, Benigno (2007). M.D.T. de precisión de la Marisma del P.N. de Doñana mediante Láser Escáner Aerotransportado (LiDAR). En: Revista del instituto de Navegación de España, No. 29, (may., 2007). p. 14-25. ISSN 1578-6064. Barcelona (España): Instituto de Navegación de España, INAVE.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC (2005) Resolución 068 [en línea]. Santafé de Bogotá (Colombia): IGAC. <http://www.igac.gov.co/igac_web/UserFiles/File/normas%20regulatorias/RESOLUCION_068_DE_2005.pdf> [consulta: 16/08/2009]
- LIU, X.; ZHANG, Z.; PETERSON, J. and CHANDRA S. (s.f.); The Effect of LiDAR Data Density on DEM Accuracy. [en línea]. Camberra (Australia): Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc. <http://www.mssanz.org.au/MODSIM07/papers/21_s46/TheEffectOfL_s46_Liu_.pdf> [Consulta: 15/08/2009].
- MINISTERIO DE TRANSPORTE (Colombia), (s.f) Proyecto Ruta del Sol, [en línea]. Santafé de Bogotá (Colombia): Ministerio de Transporte. <<http://www.proyectorutadelosol.org/index.html>> [Consulta: 15/03/2009].
- RUIZ, A.; KORNUS, W (2003). Experiencias y aplicaciones del LiDAR. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona, España.
- TERRASOLID (2010). Terrasolid – The standard for airborne and mobile Lidar data and image processing [en línea]. Helsinki (Finland): Terrasolid Ltd. <<http://www.terrasolid.fi/>> [consulta: 10/02/2010]