

## ESCANEEO LIDAR Y FOTOGRAMÉTRICO CON CÁMARA DIGITAL DE BARRIDO, UN AVANCE TECNOLÓGICO EN LA AEROTOPOGRAFÍA

### SCANNING LIDAR AND PHOTOGRAMMETRYC WITH IMAGE PUSHBROOM SENSOR, AS TECHNOLOGICAL ADVANCE IN AEROTOPOGRAPHY

Elena Mozgovaya - elena@sap.mx  
Tamara Freire Cuesta - tamara@sap.mx, Krassimir Iankov - iankov@sap.mx  
Sistemas Avanzados y Proyectos S.A. de C.V.  
Ciudad de México - México

#### RESUMEN

*La demanda de datos topográficos exactos crece cada vez más, ya que el diseño de proyectos de ingeniería como los viales, líneas de transmisión, cálculos volumétricos y detección de cambios, etc. requieren que estos sean de alta fiabilidad y calidad. Por otro lado, no se cuenta con el tiempo y presupuesto suficientes para ejecutar un levantamiento topográfico tradicional con la cantidad de información suficiente que permita detectar todos los detalles del terreno y de los objetos sobre este. La tecnología LiDAR y los levantamientos fotogramétricos aéreos permiten la adquisición de datos topográficos y la creación de mapas y modelos de terreno más rápidamente.*

*El LiDAR aerotransportado se compara favorablemente con varias tecnologías, ante todo debido a su exactitud, cualidad de sensor activo y capacidad de penetrar el dosel forestal; brindando tres características esenciales a los levantamientos topográficos: exactitud, rapidez y detalle (cantidad de información). La exactitud que provee el levantamiento LiDAR puede llegar a menos de 10 cm.*

*Este artículo se enfoca en la innovación tecnológica del escaneo simultáneo con LiDAR, cámara fotogramétrica digital de barrido (push-broom camera) y sistema GPS/IMU, formando un sistema integrado eficiente que permite obtener datos de alta calidad con el mismo ancho y largo de franja del escaneo. Lo anterior evita la multiplicidad de fotografías que tomaría una cámara digital convencional por cada franja de LiDAR, lo que obliga a disponer de gran cantidad de puntos de control tomados en campo para el proceso de aerotriangulación, implicando tiempo y costos adicionales. Con este sistema, se obtienen además otro tipo de productos como estéreopares sintéticos creados a partir de los datos LiDAR y ortofotos, logrando con ello un alto grado de precisión para el proceso de restitución fotogramétrica.*

*La empresa Sistemas Avanzados y Proyectos se implemento esta tecnología de punta para los proyectos de alta precisión e importancia para el país desde el año 2012, realizando primer proyecto relevante con esta tecnología en los meses agosto – diciembre del 2012 para la empresa DCR Consultoría Y Construcción S.A. de C.V. denominado "Levantamiento Topográfico Mediante Láser Aerotransportado (LIDAR) e imagen aérea para obtener la cartografía básica de 636.72 Km lineales de las carreteras: Magdalena-Nogales, Cananea-Imuris, Altar-Caborca, Caborca-Sonoyta, Sonoyta-San Luis Rio Colorado Y Sonoyta-Puerto Peñasco, en el estado de Sonora"*

***Palabras Clave:*** Aerotopografía, LiDAR, cámara digital de barrido, GPS/IMU, modelo digital de superficie, imágenes estéreo sintéticas, restitución fotogramétrica, precisión topográfica.

## ABSTRACT

*The demand for accurate topographic data grows increasingly; because of the engineering design projects such as roads, power lines, volumetric calculations, change detection, etc. They require land information with high reliability and quality. In the other hand, it does not have the time and budget enough to run a traditional surveying with a sufficient amount of information to detect all the details on the ground.*

*The LiDAR and aerial photogrammetric surveys allow the acquisition of topographic data and creating maps and terrain models faster.*

*The airborne LiDAR compares favorably with several technologies, primarily due to its accuracy, quality of active sensor and ability to penetrate the forest canopy; providing three essential characteristics to topographic survey: accuracy, speed and detail (quantity of information). The accuracy provided by the LiDAR survey can reach less than 10 cm.*

*This article focuses on technological innovation of simultaneous scanning with LiDAR, digital photogrammetric camera (push-broom camera) and GPS / IMU system, forming an integrated efficient system for obtaining high-quality data with the same width and length scanning strip. This prevents the multiplicity of photographs take a conventional digital camera for each strip of LiDAR, which requires the availability of a large number of control points taken in the field for the triangulation process, involving additional time and costs. With this system, it's the possible also obtained other products as synthetic stereopairs created from LiDAR data and orthophoto, thereby achieving a high degree of accuracy for photogrammetric restitution process.*

**Keywords:** Aero-topography, LiDAR, image pushbroom scanner, GPS/IMU, digital surface model, synthetic stereo images, photogrammetric mapping, topographic accuracy.

## 1. INTRODUCCIÓN

Sistemas Avanzados y Proyectos S.A. de C.V. (SAP) es una empresa mexicana que cuenta con una amplia experiencia en levantamientos fotogramétricos y aerotopográficos y capacidad instalada con aeronaves Cessna, escáneres LiDAR, cámaras digitales de barrido (*image pushbroom sensors*) y vehículos aéreos no tripulados de origen ruso.

El LiDAR (*Light Detection and Ranging*) es una técnica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de coordenadas geográficas en X, Y, Z (ESRI, 2013).

Los escáneres de barrido producen tiras continuas (*strips*) de imágenes del terreno y se basan en arreglos lineales. La cobertura de estos escáneres depende de la longitud del arreglo y tienen como elementos básicos dispositivos de carga acoplada (CCD *Charge-Coupled Device*). Un CCD consiste en una matriz de celdas sensibles a la luz, cada una de las cuales corresponde a un píxel (Petry, Walker, 2007).

Los levantamientos aéreos con sensores

LiDAR y cámaras digitales permiten la adquisición de datos topográficos e imágenes de la superficie de la tierra con gran detalle y precisión (*figura 1*). Con estos datos se pueden crear entre otros productos mapas y Modelos Digitales de Terreno (MDT) de forma rápida y económicamente factible para una gran cantidad de aplicaciones.

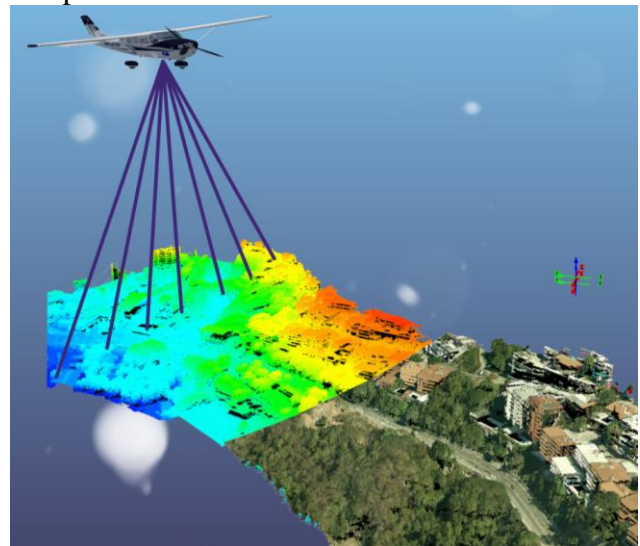


Figura 1: Escaneo del terreno con LiDAR y cámara digital de barrido

El objetivo de este documento es dar a conocer un innovador sistema integrado por un escáner LiDAR y un sensor aéreo de barrido para la obtención simultánea de líneas de vuelo (*strips*) de nubes de puntos e imágenes digitales a color con ancho de franja y longitud similares (figura 2), permitiendo una toma eficiente de los datos con el consiguiente ahorro de tiempo y recursos, ya que no se necesitan realizar dos tipos de vuelo para captar los datos provenientes de estos sensores. Por otro lado con una imagen de barrido el número de puntos de control para el proceso de aerotriangulación (alineación), se reduce considerablemente (en un 90% aproximadamente), ya que se necesitan puntos solamente para la alineación entre *strips* y no para un ajuste transversal (figura 3).

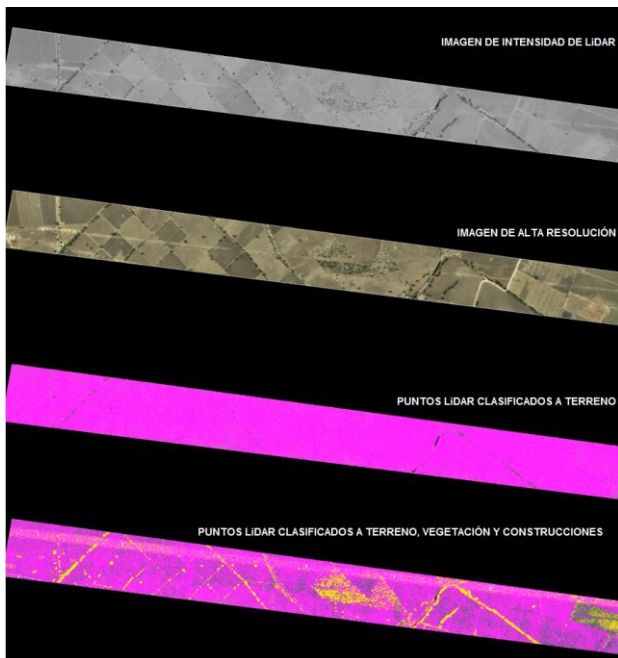


Figura 2: Productos obtenidos con el sistema LiDAR, cámara fotogramétrica de barrido y GPS / IMU

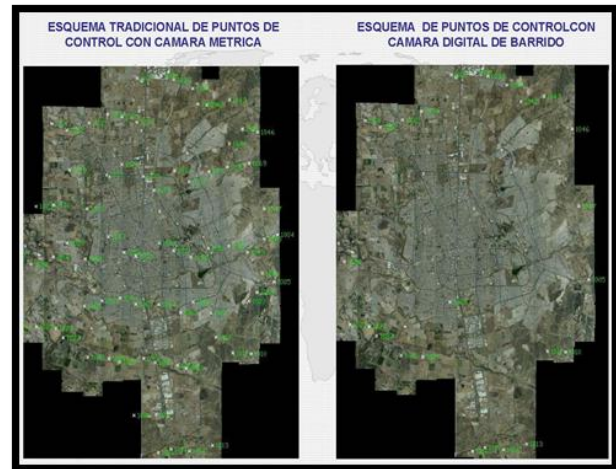


Figura 3: Puntos de control para aerotriangulación (fotografías de cámara) y alineación (imágenes de barrido)

Durante el período que se ha trabajado con este sistema ha dado excelentes resultados en cuanto a reducción de tiempo y costos con un valor agregado importante como la obtención de productos finales de alta calidad y precisión, pues la precisión de los datos LiDAR ha llegado inclusive a menos de 10 cm, lo que también beneficia el proceso de restitución fotogramétrica, ya que éste se realiza en un ambiente tridimensional, utilizando un estéreo par sintético que se crea a partir de la nube de puntos LiDAR.

## 2. SISTEMA INTEGRADO PARA ESCANEAMIENTO SIMULTÁNEO DE LIDAR E SENSOR DE IMÁGENES DE BARRIDO

Para la integración del sistema se consideraron los siguientes equipos:

- Cámara digital de barrido (sistema pushbroom) de mediano formato del fabricante Geosystem™, modelo 1-DAS-1, que consta de una matriz lineal fija de muchos sensores que se barre a través de un área por el movimiento de la plataforma, de tal modo construyendo una imagen. Se basa en sensores cuya respuesta y lectura es casi instantáneo (CCD), de modo que la franja de imagen puede segmentarse en píxeles.



Figura 4: Cámara 1-DAS-1

En la Tabla 1 se muestran las características técnicas de la cámara 1-DAS-1.

Cantidad de módulos RGB (camera channels)	1 (nadir)
Cantidad de bandas	1 (1x3)
Altura de vuelo	550 m – 5,500 m
Velocidad de vuelo	110 – 400 Km/h
Ancho de franja	360 m – 3,600 m
Distancia focal	65.53 mm
CCD línea	8,000 píxeles
CCD tamaño de píxel	9 nm
Tamaño de píxel	4.5 a 45 cm
Resolución radiogramétrica (por banda)	14 bit
Campo de visión (Field of View o FOV)	36 °

Tabla 1: Características de la cámara 1-DAS-1

La cámara fue modificada a requerimientos específicos del sistema para que abarque el mismo ancho de la franja de escaneo de LiDAR, es decir se adaptó un lente con distancia focal adecuada de 65.53 mm.

- Sensores LiDAR del fabricante RIEGL que permiten un rango de altitud de operación sobre el terreno entre 350 – 5,600 m con el pulso de repetición (PRR) de hasta 400 KHz; velocidad de escaneo de hasta 200 líneas/segundo; y ángulo de escaneo de 60° en total (+/- 30°). El sistema se configura de acuerdo a las necesidades de cada proyecto en particular

acoplando el sistema LiDAR diferente. En la actualidad se desarrollan los proyectos con los modelos de equipos: VQ-480 y Q-780.



Figura 5: LiDAR modelo VQ-480 y Q-780

En la Tabla 2 se presentan principales características de LiDAR VQ-480.

Technical Data RIEGL VQ <sup>®</sup> -480	
<b>Laser Product Classification</b>	Class 1 Laser Product according to IEC60825-1:2007 <small>The following class applies for instruments delivered into the United States. Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant to Laser Notice No. 50, dated June 24, 2009.</small>
<b>Range Measurement Performance</b>	time-of-flight measurement, echo signal digitization, online waveform processing
<b>Measuring Principle</b>	
Laser Pulse Repetition Rate PRR <sup>1)</sup>	50 kHz, 100 kHz, 150 kHz, 200 kHz, 300 kHz
Effective Measurement Rate (meas./sec) <sup>1)2)</sup>	25 000, 50 000, 75 000, 100 000, 150 000
Max. Unambiguous Measuring Range <sup>3)</sup>	950 m, 750 m, 650 m, 550 m, 450 m natural targets ρ ≥ 20% natural targets ρ ≥ 60%
Max. Operating Flight Altitude AGL <sup>5)</sup>	750 m (2450 ft), 600 m (2000 ft), 550 m (1800 ft), 450 m (1500 ft), 350 m (1150 ft)
Max. Number of targets per Pulse	practically unlimited (details on request)
Minimum Range	10 m
Accuracy <sup>6)7)</sup>	25 mm
Precision <sup>8)9)</sup>	25 mm
Laser Pulse Repetition Rate PRR <sup>1)10)</sup>	up to 300 kHz
Max. Effective Measurement Rate <sup>11)</sup>	up to 150 000 meas./sec (@ 300 kHz PRR & 40° FOV)
Echo Signal Intensity	for each echo signal, high-resolution 16 bit intensity information is provided
Laser Wavelength	near infrared
Beam Divergence	0.3 mrad
Laser Beam Footprint (Gaussian beam Definition)	31 mm @ 100 m, 75 mm @ 250 m, 150 mm @ 500 m
<b>General Technical Data</b>	
Power Supply Input Voltage	18 - 32 V DC
Power Consumption	typ. 65 W
Main Dimensions / Weight	360.5 x 219 mm (length x width), approx. 13 kg
Humidity	max. 80% non condensing @ +31°C
Protection Class	IP64, dust and splash-proof
Max. Flight Altitude (operating)	16 500 ft (5 000 m) above MSL
Max. Flight Altitude (not operating)	18 000 ft (5 500 m) above MSL
Temperature Range	-10 °C to +40 °C (operation) / -20 °C to +50 °C (storage)

Figura 6: Características del LiDAR VQ-480

- Los dos equipos comparten un mismo sistema GPS/IMU SPAN-SE del fabricante Novatel, con el IMU del modelo LN-200 (figura 7), con lo cual se garantiza la precisión alta en la captura de los datos.



Figura 7: Sistema SPAN-SE



- El sistema esta soportado por el centro de grabación de datos a bordo que consiste en una CPU con dos discos sólidos para el almacenamiento de imágenes y datos LiDAR y cuatro monitores para el control de vuelo y de foto navegación, fabricante GeoSystem.



Figura 8: Sistema de almacenamiento de datos

La configuración del sistema se adapta a las necesidades de cada cliente de un proyecto determinado.

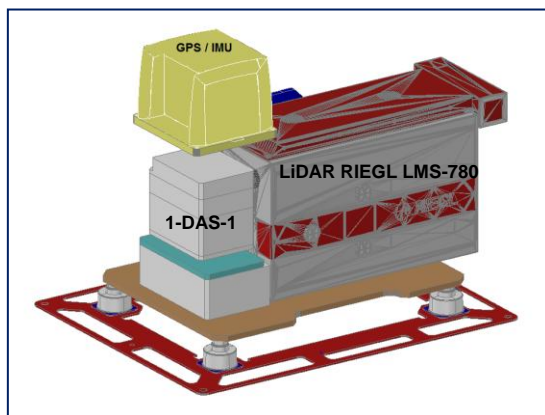


Figura 9: Esquema del sistema integrado LiDAR, cámara fotogramétrica de barrido y GPS/IMU

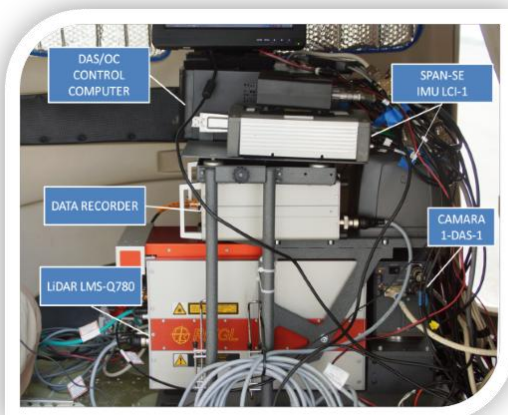


Figura 10: Sistema integrado colocado al interior de la aeronave

El funcionamiento del sistema integrado es el siguiente: la cámara digital captura la imagen con sensores de alta frecuencia, mediante un proceso denominado "pushbroom", la frecuencia de lectura varía con la velocidad y la altura de vuelo, pero este habitualmente está en el intervalo de 200 a 800 Hz. Por su parte el LiDAR en la misma dirección del vuelo recolecta datos del rebote de pulsos con una frecuencia más alta. Al mismo tiempo el GPS e IMU registran lecturas a cada cierto intervalo, en caso del IMU LN-200 son 200 lecturas por segundo de los movimientos angulares del avión (roll, pitch, yaw). Todos los datos son grabados en el dispositivo de almacenamiento con discos sólidos. En resultado y en el post proceso se calcula la única trayectoria del vuelo con la orientación absoluta en cada punto (X, Y, Z, phi, capa, omega) con el software Inertial Explorer del fabricante Novatel.

De acuerdo a este análisis aproximado, para una velocidad promedio de la aeronave de 80 millas náuticas por hora, se tendrían datos directos de orientación absoluta precisa a cada 20 cm. Esto significa que el funcionamiento integrado entre el sistema GPS/IMU y los sensores remotos (láser y cámara) es óptimo.

La ventaja de utilizar el sistema antes descrito es procesamiento homogéneo de datos de cámara y de LiDAR con una sola trayectoria de vuelo, lo que elimina en su mayor parte los errores de incompatibilidad de datos grabados en diferentes tiempos.

Lo anterior permite obtener una imagen ortogonal proveniente de la cámara de barrido con una alta precisión, debido al ángulo de la visión reducido cual está ajustado al ángulo del LiDAR (60°), se disminuye la distorsión de la perspectiva en la imagen y gracias a la integración con el sistema GPS/IMU.

### 3. FASES DE LA METODOLOGÍA DE ESCANEO

Para la ejecución de un proyecto se sigue los pasos siguientes:

- *Análisis de requerimientos y elaboración del plan de vuelo*
- *Ejecución de vuelos*

- *Trabajo de campo*
- *Cálculo de trayectorias de vuelo*
- *Procesamiento de los datos LiDAR*
- *Clasificación de la nube de puntos LiDAR*
- *Procesamiento de imágenes digitales*
- *Generación del estéreo par sintético*
- *Restitución planimétrica*

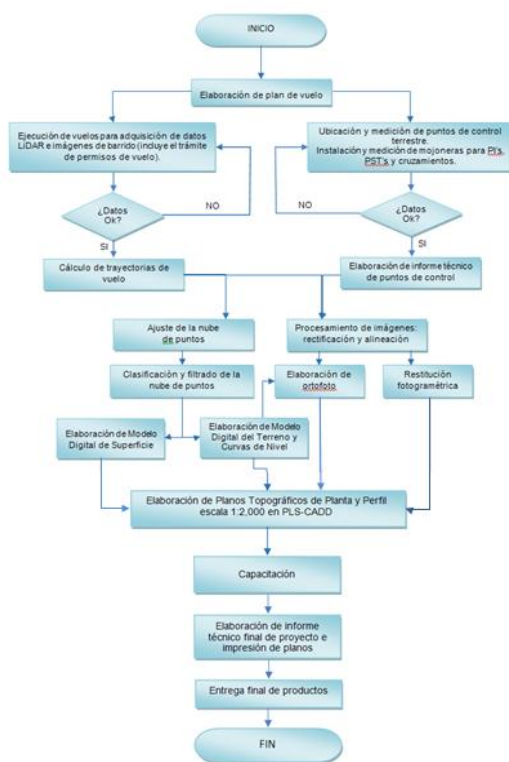


Figura 11: Flujo de trabajo para un proyecto de Líneas de Transmisión

#### 4. VENTAJAS

Con lo antes descrito, se puede vislumbrar la multiplicidad de ventajas de la aplicación de la tecnología LiDAR y de las imágenes de barrido, y la potenciación y ahorro de recursos cuando se utilizan en forma conjunta. A continuación se mencionan algunas de ellas:

- Configuración precisa del terreno, facilitando la proyección de alternativas para proyectos viales, de líneas de transmisión, gasoductos, detección de cambios, etc.; incluso en aquellas zonas donde existe vegetación alta y densa.
- Plazos de entrega cortos, comparado con levantamientos topográficos terrestres,

puesto que se trata de un sistema aerotransportado capaz de adquirir datos sobre cientos de km<sup>2</sup> en un solo día.

- La información generada se puede utilizar para otros fines, como por ejemplo modelar bosques, edificios y otros elementos antropogénicos; permitiendo identificar inclusive zonas arqueológicas, suelos con carsticidad y realizar cálculos de biomasa; datos que sin duda ofrecen una importante aportación para determinar la factibilidad total o parcial de un proyecto.
- Esta tecnología ofrece el beneficio de no requerir acceso directo por tierra a la zona de interés, lo que conlleva ventajas tanto de seguridad como de reducción de costos en zonas inaccesibles o de mucho tránsito.
- Al combinar el LiDAR con fotogrametría, la extracción de la planimetría es mucho más fácil y exacta porque el operador de fotogrametría sigue los elementos visibles y puede compilar con gran exactitud las líneas de ruptura donde existen cambios topográficos abruptos.

#### 5. DESVENTAJAS

La tecnología LiDAR, por sí sola, es costosa para proyectos con extensiones de terreno muy pequeñas.

Para aplicaciones con requerimientos de precisión milimétrica es preferible un levantamiento terrestre, sobre todo en terrenos con pendientes abruptas.

#### 6. CONCLUSIONES

La tecnología del sensor LiDAR combinada con cámara digital de barrido, asegura obtener productos adicionales para complementar el levantamiento aerotopográfico de grandes extensiones de terreno, reduciendo costos y tiempo de ejecución. Por otro lado, la fotogrametría se beneficia de la precisión de los datos LiDAR, permitiendo generar productos fotogramétricos de altísima calidad y precisión centimétrica (en algunos casos menores a 10 cm.)

El levantamiento de la topografía del terreno con LiDAR e imágenes de barrido, de manera

simultánea, reduce considerablemente los costos y permite un acople perfecto de los datos, dando lugar a productos adicionales muy interesantes desde el punto de vista tecnológico y de valor agregado a los proyectos, ya que la creación de un par estereoscópico sintético originado de los datos LiDAR ofrece un mejoramiento significativo en la precisión, al proceso de restitución fotogramétrica.

AUTODESK, Manual de Autocad y Civil 3D, 2015.

ESRI, Manual de ArcGIS 10.1, Diciembre 2013.

Fricke, P., Gervais, F., Roth, R., Llorens, P., Delgado, J., and Cardenal, J., 2002, Utilización de sensores aerotransportados para la generación de MDT y ortofotografías: LH ADS40 Y LH ALS40, *XIV Congreso*

## REFERENCIAS

*Internacional de Ingeniería Gráfica*. Santander: Universidad de Cantabria, 1-10.

Forlani, G., Nardinocchi, C., Scaioni, M., and Zingaretti, P., Enero 2006, Complete classification of raw LIDAR data and 3D reconstruction of buildings, *Pattern Analysis and Applications*, **8**, 357–374.

Petrie, Gordon; Walker, Stewart. Airborne Digital Imaging Technology: A New Overview. *The Photogrammetric Record* 22(119): 2003-225.