

DOI:10.25100/eg.v0i25.12228
Espacios y Territorios

Fotogrametría de alta resolución espacial utilizando el método de estructura de movimiento (SfM) y vehículos aéreos no tripulados

High spatial resolution photogrammetry using the structure from motion (SfM) method and unmanned aerial vehicles

Fotogrametria de alta resolução espacial utilizando o método de estrutura a partir do movimento (SfM) e veículos aéreos não tripulados

Edna De la Llata Quiroga

Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, Sonora, México. ednadelallata@gmail.com | 0000-0003-1386-891X

Para citar este artículo: De la Llata-Quiroga, E. (2023). Fotogrametría de alta resolución espacial utilizando el método de estructura de movimiento (SfM) y vehículos aéreos no tripulados. *Entorno Geográfico*, (25), e21712228. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i25.12228>

Resumen

La obtención de modelos de elevación digital de alta resolución espacial requiere de tecnologías geoespaciales modernas como la altimetría laser y el escaneo láser terrestre. Sin embargo, estas tecnologías presentan algunas limitaciones, como un alto costo y el requerimiento de una elevada logística. Este trabajo integra el uso de vehículos aéreos no tripulados de bajo costo con cámaras fotográficas digitales comunes y el método de análisis de imágenes conocido como “Estructura de Movimiento” (SfM). Esta integración permite el desarrollo de fotogrametría con resolución espacial por debajo de un metro utilizando un mínimo de puntos de control. Se generó una ortofoto con resolución de 20 cm y un modelo de elevación digital con resolución de un metro. El modelo de elevación digital presentó ventajas sobre un modelo generado por altimetría laser (LiDAR), así como una red de drenaje con mayor detalle. Los resultados de este trabajo pueden ayudar al desarrollo de técnicas de bajo costo para la detección de cambios en la superficie terrestre que requieren de alta precisión y continuo monitoreo.

Palabras clave: cuenca, modelo de elevación digital y sierra Los Locos



Abstract

Obtain high-resolution digital elevation models requires modern geospatial technologies, such as Light Detection and Ranging (LiDAR) and Terrestrial Laser Scanning (TLS). However, these technologies have limitations, such as their high cost and the requirement of high logistics. This work integrates the use of low cost unmanned aerial vehicles with common digital cameras and the image analysis method known as Structure from Motion (SfM). This integration allows the development of photogrammetry with spatial resolution below one meter using a minimum of control points. An orthophoto was generated with a resolution of 20 cm and a digital elevation model with a resolution of one meter using the Structure from Motion method, the digital elevation model presented advantages over a model generated by LiDAR whose spatial resolution is five meters, the Structure from Motion model presented higher resolution, as well as a drainage network in detail. The results of this work can help with the development of low cost techniques for the detection of changes in the earth's surface that require high precision and continuous monitoring.

Keywords: basin, digital elevation model and sierra Los Locos

Resumo

A obtenção de modelos digitais de elevação com alta resolução espacial requer o uso de tecnologias geoespaciais modernas, como a altimetria a laser e o escaneamento a laser terrestre. No entanto, essas tecnologias apresentam algumas limitações, como alto custo e exigência de logística complexa. Este trabalho integra o uso de veículos aéreos não tripulados de baixo custo, equipados com câmeras fotográficas digitais convencionais, e o método de análise de imagens conhecido como “Estrutura a partir do Movimento” (SfM). Essa integração permite o desenvolvimento de fotogrametria com resolução espacial inferior a um metro, utilizando um número mínimo de pontos de controle. Foi gerada uma ortofoto com resolução de 20 cm e um modelo digital de elevação com resolução de um metro. O modelo digital de elevação apresentou vantagens em relação a um modelo gerado por altimetria a laser (LiDAR), além de uma rede de drenagem com maior nível de detalhe. Os resultados deste trabalho podem contribuir para o desenvolvimento de técnicas de baixo custo para a detecção de mudanças na superfície terrestre que exigem alta precisão e monitoramento contínuo.

Palabras-chave: bacía hidrográfica, modelo digital de elevação e Serra Los Locos

Recibido: 2 de junio de 2022

Aceptado: 27 de septiembre de 2022

Publicado: 15 de enero de 2023

1. INTRODUCCIÓN

La última década ha sido testigo de una revolución tecnológica en el campo de la geomática. Esta nueva disciplina se define como un conjunto de ciencias que integran diferentes medios para la captura, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica (Westoby *et al.*, 2012).

La altimetría laser (LiDAR por sus siglas en inglés, Light Detection and Ranging) es una técnica de teledetección óptica que utiliza luz de láser para determinar la elevación de los objetos presentes sobre una superficie (Environmental Systems Research Institute, 2016). Se basa en la emisión de pulsos de luz de láser desde una plataforma aérea o terrestre, la medición precisa del tiempo de retorno del láser al sensor permite calcular la distancia que separa al sensor de la superficie terrestre y de los objetos que existen sobre ella. Una vez que la posición y orientación del sensor son conocidas, y cada señal de retorno tiene coordenadas tridimensionales, se puede obtener un modelo de elevación digital de la superficie estudiada. (Magdaleno y Martínez, 2006). Sin embargo, el uso de esta tecnología representa altos costos, y requiere de una elevada logística.

El método de estructura de movimiento (SfM, por sus siglas en inglés, *Structure from Motion*) ofrece una alternativa para generar fotogrametría de alta resolución espacial de bajo costo es una técnica de modelado en 3D basada en la capacidad de la visión humana para reconstruir estructuras tridimensionales a partir de imágenes 2D proyectadas en la retina (Pereira, 2013). Este método genera una nube de puntos densa a partir de fotografías, la cual posteriormente es procesada para obtener un modelo topográfico (DTM) o un modelo de elevación digital (DEM). Mediante el uso de este método se reducen costos y la necesidad de un equipo especializado, ya que solo utiliza cámaras digitales comunes y paquete de procesamiento de imágenes automatizado, que puede ser de uso libre (Micheletti *et al.*, 2015).

La integración del método SfM con el uso de vehículos aéreos no tripulados, representa una alternativa viable para la generación de fotogrametría de alta precisión. Los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés, Unmanned Aerial Vehicles) son vehículos que pueden volar de forma autónoma o ser piloteados de forma remota. Este tipo de vehículos han ido evolucionado rápidamente desde la década pasada, en un inicio fueron utilizados principalmente con fines militares (Hugenholtz *et al.*, 2013). Sin embargo, sus aplicaciones se han extendido en el campo de la geomática, y representan un gran avance para la colección de imágenes empleadas en el método SfM. El empleo de vehículos aéreos no tripulados tiene ciertas ventajas sobre los tripulados, como: un bajo costo de operación, mayor seguridad, flexibilidad en la planeación, y mayor proximidad al área que se desea fotografiar mejorando la resolución de datos para el método SfM. (Johnson *et al.*, 2014; Rango *et al.*, 2006). El globo de helio cautivo (atado con un cable a tierra firme) ofrece la ventaja de la simplicidad, en condiciones óptimas de vuelo una sola persona puede jalar la plataforma para capturar imágenes del área de interés. (Watts *et al.*, 2012).

El empleo de imágenes aéreas de alta resolución tiene aplicaciones importantes como el monitoreo de la fenología de la vegetación, topografía de alta resolución espacial y la caracterización de cuencas hidrológicas. El presente trabajo pretende integrar el uso de plataformas aéreas de bajo costo con el método de procesamiento de imágenes SfM para generar fotogrametría de alta resolución espacial y compararla con un modelo de elevación digital generado con LiDAR.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

Se realizó un barrido de fotografías en un sitio de estudio eco hidrológico (32 hectáreas) dentro de la cuenca Sierra Los Locos. El área donde se realizó el barrido de fotografías se localiza en la división de las cuencas de los ríos San Miguel y Sonora (29°57'45,80"N y 110°27'38,59"O) y a 150 km, al noroeste de Hermosillo, Sonora, México, dentro del área de influencia de muestreo de una torre de flujos turbulentos.

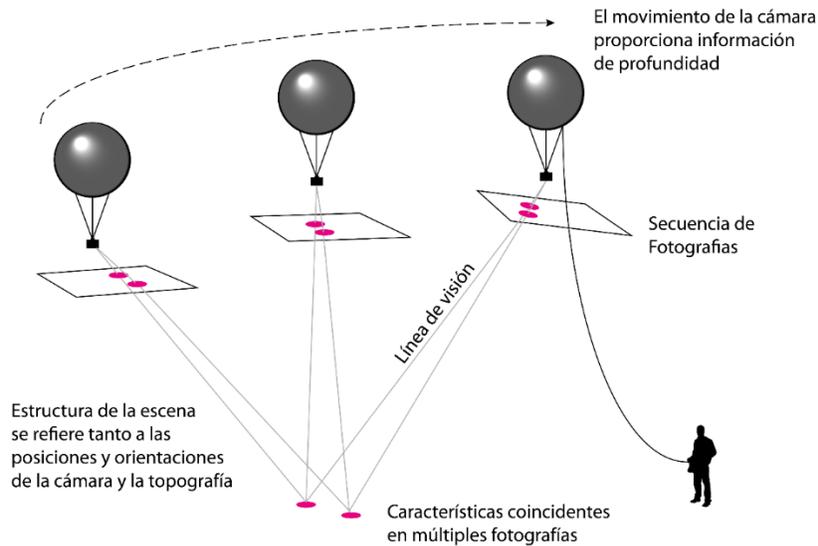
La Cuenca de Sierra Los Locos se caracteriza por su topografía irregular y por tener un clima

semiárido, de acuerdo con la clasificación de Köppen-Geiger (Peel *et al.*, 2007) con temperaturas invernales mayores a 0°C. La precipitación varía de 500-700 mm/año, con el 60-70% de precipitaciones de julio a septiembre, por lo que el régimen lluvioso se considera como parte del monzón de Norte América. La cuenca presenta cinco principales tipos de vegetación: matorral subtropical, vegetación ribereña, bosques de encinos, bosques de coníferas y pastizales. (Xiang y Gochis, 2014).

Adquisición de fotografías

Para el barrido de fotografías se utilizó un globo cautivo de helio con volumen de 4m³ al cuál se le colocó una cámara digital de 16 megapíxeles (Pentax WG-3 GPS), la cual se programó para tomar una fotografía cada 5 segundos, con el fin de garantizar solapamiento entre ellas. El globo se mantuvo cautivo utilizando una cuerda de cometa ligera y un carrete (Figura 1). Se realizaron dos rondas de fotografías, una durante la mañana y otra por la tarde.

Figura 1. Técnica de adquisición de fotografías para el método estructura de movimiento, se adquieren múltiples fotografías en distintas posiciones. Basado en Johnson et al. 2014.



Basado en Johnson et al., 2014

Fuente: Johnson *et al.*, 2014.

Procesamiento de imágenes

El procesamiento de imágenes y generación de los modelos de elevación de terreno y vegetación se realizó utilizando el software comercial Photoscan Pro (v. 1.2.3) (AgiSoft, 2016) desarrollado por la compañía Agisoft LCC. (Figura 2). Las imágenes fueron procesadas mediante un equipo de cómputo de alto desempeño, una estación de trabajo Dell Precisión Workstation T5600 de 32 procesadores en paralelo (Xeon).

Proceso de calidad

Se llevó a cabo un proceso en el cuál, se examinaron visualmente las fotografías obtenidas encampo, descartando las imágenes borrosas, desenfocadas o con poca nitidez. También, se eliminaron las fotografías que fueron tomadas a distintas horas de la primera ronda de fotos (esto debido a que el cambio de luz durante el día puede causar un efecto espejo al procesar las imágenes, o no se encuentren puntos en común), se descartaron el 44% de las fotografías.

Nube de puntos

Las fotografías se agregaron al software Photoscan Pro para ser procesadas, se alinearon y el software detectó puntos en común entre cada fotografía. Con cada uno de los puntos en común entre dos o más fotografías se genera un conjunto conocido como nube de puntos.

Nube de puntos densa

Basado en la estimación de las posiciones de la cámara, el programa calcula la información para combinarla y crea una nube de puntos más densa. A diferencia de la nube de puntos, la nube de puntos densa contiene mayor información del terreno por lo que genera mayor número de puntos en común y mayor detalle.

Georreferenciación

Se tomaron 4 puntos de control (GCP's) distribuidos a lo largo de todo el sitio de estudio utilizando un GPS de precisión (Trimble GeoXH 6000 GNSS). Se contempló que estos puntos fueran fácilmente distinguibles en la imagen a procesar: el cruce de caminos, la entrada al sitio de estudio, el vertedor y la torre de flujo turbulento (eddy covariance). Con

los puntos se creó una tabla en formato texto (txt) donde se agregaron las coordenadas en proyección UTM y la elevación sobre el nivel del mar (Tabla 1). Posteriormente se localizaron los puntos de control en la imagen procesada mediante el software Photoscan Pro y se añadieron sus coordenadas agregando la tabla en formato texto.

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de control (GCP's)

	X	Y	Z	
1	552107,589	3314908,489	1456,201	Cruce de camino
2	552045,714	3314709,919	1458,851	Entrada
3	551950,259	3314731,738	1443,804	Vertedor
4	551994,91	3314731,172	1454,545	Torre

Fuente: Elaboración propia, 2021

Clasificación de capas

Utilizando el software Photoscan Pro mediante la herramienta de clasificación, se separó la vegetación del suelo. Este proceso se realizó en dos pasos: 1. La nube de puntos densa se dividió en celdas de 50 centímetros en cada celda se detectó el punto más bajo y en el software se realizó una triangulación de estos puntos, dando la primera aproximación al modelo de terreno; 2. El punto más bajo detectado en el paso anterior se añadió como clasificación de suelo. Para realizar esto se añadieron ciertos parámetros, un ángulo máximo de 15° y una distancia máxima de 1 metro.

Malla

Mediante el modelo de nube de puntos densa, se generó un modelo poligonal, para obtener una imagen con amplio detalle de la topografía del terreno.

Modelo de elevación digital (DEM)

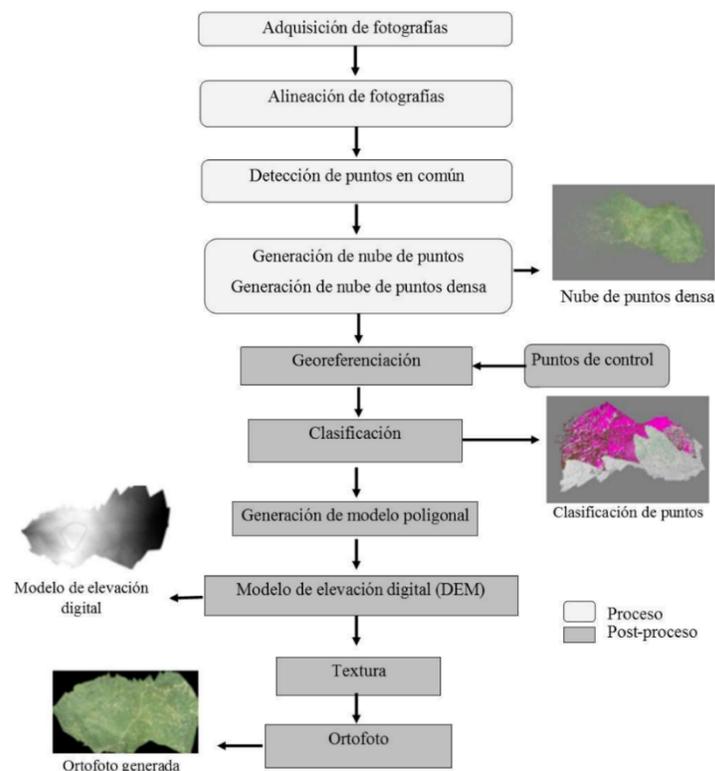
Se utilizaron los puntos generados como clasificación del suelo y el software Photoscan Pro para remover la vegetación, con ello se generó un modelo de elevación digital (DEM). El

modelo se exportó como archivo TIFF con proyección WGS84/UTM zona 12. Para remover el efecto de cambio drástico en el DEM ocasionado por la base de la vegetación, se realizó un suavizado mediante la herramienta “Aggregate” (Environmental Systems Research Institute, 2012). El cual se generó mediante la estimación de la media de una ventana de 5 píxeles, interpolando los espacios donde se encontraba la vegetación, con lo cual se redujo el efecto.

Textura y Ortofoto

Utilizando el software, los puntos de clasificación de suelo vegetación, y la malla, se generó textura en el terreno y se creó una ortofoto georreferenciada de alta resolución espacial de 20 cm para una superficie de 32 hectáreas. La ortofoto se exportó en archivo TIFF con sistema de coordenadas WGS84/UTM zona 12.

Figura 2. Pasos del método Estructura de movimiento, desde la captura de fotografías hasta la elaboración de la ortofoto y el DEM



Fuente: Elaboración propia, 2016.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ortofoto

Se obtuvieron un total de 530 fotografías en toda el área de estudio durante el barrido fotográfico, con las cuales se obtuvo una ortofoto con resolución espacial de 20 cm para una superficie de 32 hectáreas (Figura 3). Se elaboró un manual que describe el procesamiento de imágenes y generación de ortofoto y DEM.

La ortofoto generada presenta una resolución similar a la de otras ortofotos generadas con LiDAR. Magdaleno y Martínez (2006) generó una ortofoto de alta resolución espacial (20 cm) y temporal empleando el sensor Falcon II en la Cuenca hidrográfica del Ebro en España. La resolución de la ortofoto generada con el método SfM es similar, pero a un costo mucho menor, ya que solamente se utilizó una cámara digital y un globo cautivo de 4 m³ de helio. Por lo que se demuestra que se puede obtener ortofotos con el método SfM a bajo costo, de igual o mejor resolución que LiDAR y otros métodos.

Figura 3. Ortofoto generada con el método estructura de movimiento (SfM), con una resolución de 20 cm.



Fuente: Elaboración propia, 2016.

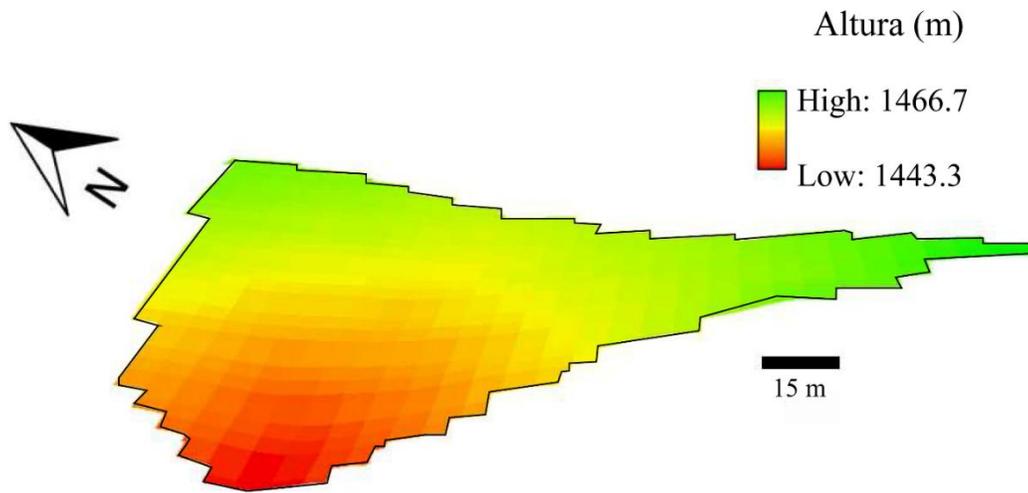
Modelo de elevación digital (DEM)

Se generó un DEM con una resolución de un metro. Johnson *et al.* (2014), realizaron un estudio utilizando el método SfM y vehículos aéreos no tripulados para generar fotogrametría, generaron un DEM de un abanico aluvial de 0.1 km², utilizando 233 fotografías, obtuvieron un DEM con resolución de 3 cm, obteniendo una mayor resolución que nuestro modelo. Esto puede deberse a que el tamaño de nuestro sitio de estudio es mayor y se obtuvieron menor cantidad de fotografías por metro cuadrado, sin embargo, sigue siendo una resolución muy buena. Lo que nos indica que este método es mejor para áreas pequeñas donde se requiera tener gran resolución.

Al compararse los DEMs del método SfM con el de LiDAR, (Figura 4, Figura 5) se puede observar que la morfología de la cuenca varía en función de la resolución utilizada para su delimitación; el modelo de LiDAR presenta poco detalle del terreno y un área de 19.2 km. El modelo obtenido por SfM presenta un área similar a la cuenca obtenida por LiDAR siendo de 20.9 km², con una diferencia de 1.7 km respecto a la cuenca obtenida con LiDAR. Se observa mayor detalle en el DEM de la cuenca.

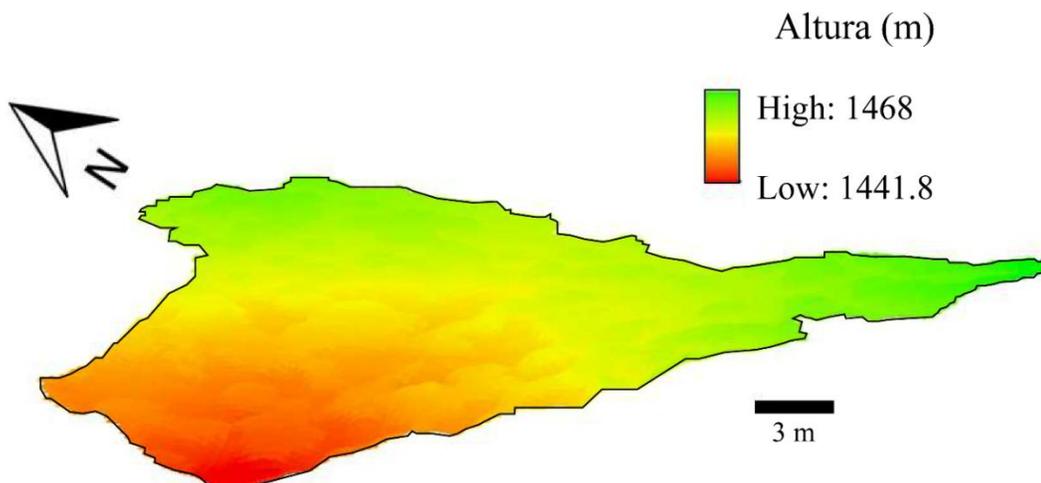
Se puede observar que la altura mínima del modelo SfM es de 1441,85 msnm y la de LiDAR es de 1443,3 msnm, mostrando una variación de dos metros. La altura máxima del modelo de SfM es de 1468 m, y la de LiDAR es de 1466,7 m, con una diferencia de 1,3 m. Estas variaciones se pueden deber a la precisión con la que LiDAR elimina la vegetación dejando únicamente el terreno, el método SfM puede no ser tan preciso al remover la misma, ya que, al ser fotografías, se requiere hacer una interpolación en las áreas donde se ha removido la vegetación, pudiendo causar variaciones de terreno. Lo mismo se observa en el modelo de diferencia (Figura 6) en el que se puede apreciar que el método de SfM presenta menor altura en la parte donde se encuentra el vertedor, lo que puede indicar mayor detalle en la red de drenaje, el área de color rojo indica que el modelo de estructura de movimiento presenta mayor altitud que el modelo de LiDAR probablemente debido al mismo factor de la vegetación, siendo el método SfM más preciso en áreas con poca vegetación y menos preciso en áreas de extensa vegetación.

Figura 4. Modelo de elevación digital de LiDAR



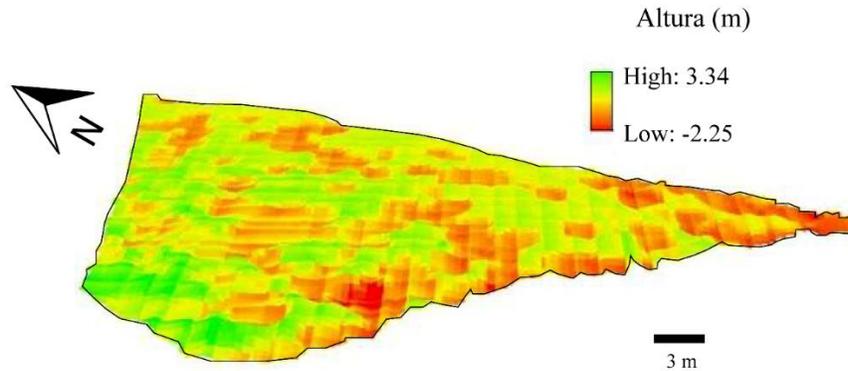
Fuente: Elaboración propia, 2016

Figura 5. Modelo de elevación digital (DEM) generado por el método estructura de movimiento (SfM)



Fuente: Elaboración propia, 2016

Figura 6. Modelo de diferencia entre el modelo de LiDAR y el modelo SfM. La parte verde indica que el modelo con LiDAR tiene mayor altura que el modelo SfM. La parte roja indica que el modelo con LiDAR tiene menor altura que el modelo de SfM.

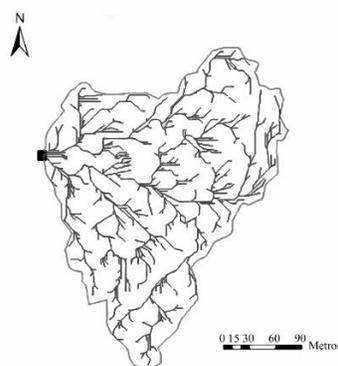


Fuente: Elaboración propia, 2016

Red de drenaje

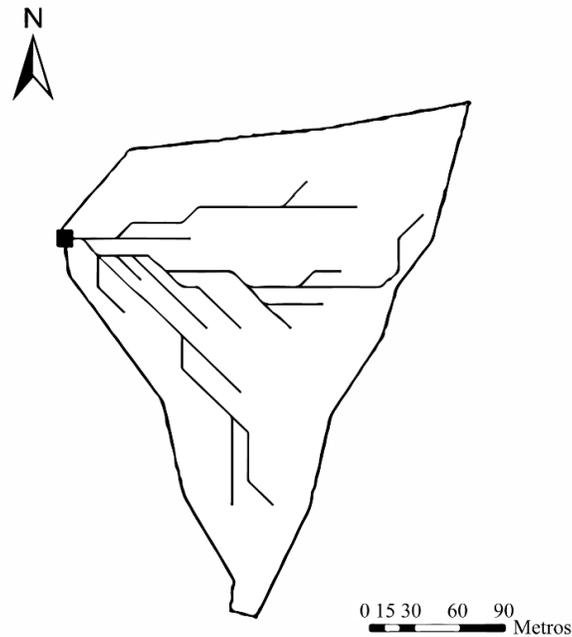
La red de drenaje con SfM presentó mayor detalle que la de LiDAR (Figura 7, Figura 8). Lo anterior permite concluir que el método de SfM presenta ventajas en estudios hidrológicos, estudios de pequeñas cuencas o microcuencas con redes de drenaje de primer o segundo orden y en áreas focalizadas, que requieran detalle y precisión. El modelo LiDAR es más útil cuando se requiere realizar mapeos en áreas de gran extensión.

Figura 7. Red de drenaje, generado con el modelo de elevación digital del método estructura de movimiento.



Fuente: Elaboración propia, 2016

Figura 8. Red de drenaje, generado con el modelo de elevación digital de LiDAR.



Fuente: Elaboración propia, 2016.

4. CONCLUSIONES

El método SfM es un método sencillo y práctico para obtener ortofotos de alta resolución espacial con características similares a las obtenidas con LiDAR, con la ventaja de ser un método económico, en el que se requiere poca logística. Sin embargo, si se requiere generar ortofotos para grandes superficies es necesario hacer vuelos a mayor altura (lo cual reduce la resolución espacial). Si lo que se busca es mayor resolución espacial en áreas pequeñas el método SfM representa una alternativa más económica para generar ortofotos y modelos de elevación digital de alta resolución espacial.

Se recomienda realizar estudios con el método SfM en sitios con poca vegetación y tomar puntos de control en el terreno con un GPS de precisión para obtener un procesamiento más rápido de las imágenes pues ahorra tiempo en la alineación y detección de puntos en común de las imágenes, y se crea una georreferenciación más fiable.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) por proporcionar sus instalaciones y equipos para llevar a cabo este proyecto, al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) por proporcionarme el modelo de elevación digital del sitio de estudio, al Dr. Luis Méndez Barroso por brindarme información necesaria, ayudarme en la obtención de fotografías y enseñarme la técnica SfM.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AgiSoft. (2016). *AgiSoft PhotoScan Professional (Version 1.2.6) (Software)*.
<https://bit.ly/2P7yKIY>

Environmental Systems Research Institute. (2016). *What is lidar data?* Environmental Systems Research Institute. <https://bit.ly/3XscFOa>

Environmental Systems Research Institute. (2012). *ArcGIS Release 10.1*. Environmental Systems Research Institute.

Hugenholtz, C., Whitehead, K., Brown, O., Barchyn, T., Moorman, B., LeClair, A., Riddell, K., & Hamilton, T. (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*, 194, 16-24.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.023>

Johnson, K., Nissen, E., Saripalli, S., Arrowsmith, R., McGarey, P., Scharer, K., Williams, P., & Blisniuk K. (2014). Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion. *Geosphere*, 10(5), 969-986.
<https://doi.org/10.1130/GES01017.1>

Magdaleno, F, y Martínez R. (2006). Aplicaciones de la teledetección láser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. *Ingeniería civil*, 142, 1-15.

- Micheletti, N., Chandler, J., & Lane, S. (2015). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. En L. Clarke y J. Nield (Eds.), *Geomorphological Techniques*, (pp. 2-12), British Society for Geomorphology.
- Peel, M., Finlayson, B., & McMahon, T. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pereira, J. (2013). Modelado 3D en patrimonio por técnicas de structure frommotion. *Revista Ph*, 1, 77- 87. <https://bit.ly/3GK4mHB>
- Rango, A., Laliberte, A., Steele, C., Herrick, J., Bestelmeyer, B., Schmutge, T., Roanhorse, A., & Jenkins, V. (2006). Research Article: Using Unmanned Aerial Vehicles for Rangelands: Current Applications and Future Potentials. *Environmental Practice*, 8(3) 159-168. <https://doi.org/10.1017/S1466046606060224>
- Watts, A., Ambrosia, V., & Hinkley, E. (2012). Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote sensing*, 4(6), 1671-1692. <https://doi.org/10.3390/rs4061671>
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., & Reynolds, J. (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 175, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Xiang, T., Vivoni, E., & Gochis, D. (2014). Seasonal evolution of ecohydrological controls on land surface temperature over complex terrain. *Water Resources Research*, 50(5), 3852-3874. <https://doi.org/10.1002/2013WR014787>