

## Cartografía geológica asistida por dron: cerro de san cristóbal, Hidalgo Dron assisted geological mapping: cerro de san cristóbal, Hidalgo

A. Juárez-Montiel <sup>a</sup>, M. Díaz-Jiménez <sup>a</sup>, J.C. Escamilla-Casas <sup>b,\*</sup>, E.M. Uribe-Alcántara <sup>b</sup>  
L.E. Ortiz-Hernández <sup>b</sup>, S. Montiel-Palma <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Pasante de la Licenciatura en Ing. en Geología Ambiental, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>b</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>c</sup> Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

### Resumen

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT) o drones permiten obtener fotografías del terreno, con resolución centimétrica, en corto tiempo y bajo costo. Consecuentemente, ha proliferado su uso en cartografía geológica ya que, las imágenes se integran en orto mosaicos para interpretar y generar mapas preliminares confiables y económicos, comparados con los tradicionales. En este artículo, se presenta la fotointerpretación de 101 ha del sector oriental del Cerro de San Cristóbal (al norte de Pachuca, Hidalgo), a partir de imágenes con resolución de 10 cm. El área presenta topografía extremadamente agreste, con variabilidad de elevación de hasta 400 m. Para generar esta cartografía tomó ocho horas de trabajo de campo (vuelo de dron, Inspire 1 Pro de DJI) y dieciocho de gabinete (procesamiento de imágenes y fotointerpretación). En el mapa se identificaron tres litologías y fallas de alto ángulo. Se sugiere que, efectivamente, el uso de drones es idóneo en la identificación preliminar de rasgos geológicos, más que la cartografía tradicional.

**Palabras Clave:** Dron, Cartografía, Fotointerpretación, Cerro de San Cristóbal, Hidalgo

### Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) or drones allow the acquisition of centimeter-resolution land images in short time and low cost. Consequently, their use in geological mapping has proliferated as the images can be integrated into ortho mosaics for interpretation and generation of reliable and inexpensive geologic cartography, in comparison to traditional mapping. In this article, the photointerpretation of 101 ha in the east sector of Cerro de San Cristóbal (north of Pachuca, Hidalgo) is presented, using images with a 10 cm resolution. Mapped area is dominated by extremely abrupt topography, with a range of elevation around 400 m. The work to produce the geologic map, involved 8 hours of fieldwork (flight with a DJI Inspire I Pro drone) and 18 hours of office work (image processing and photointerpretation). On the map, three lithologic units and high-angle faults were identified, suggesting that, effectively, the use of drones is ideal in the preliminary identification of geological features, more than in traditional mapping.

**Keywords:** Drone, Cartography, Photointerpretation, Cerro de San Cristóbal, Hidalgo

### 1. Introducción

Los mapas geológicos son herramientas que plasman, de manera interpretativa, la visión tridimensional de rocas, sedimentos, estructuras y suelos, describiendo su distribución y edades relativas (Lisle, 2021). Adicionalmente, un mapa geológico es un soporte de gran valía para la exploración, urbanismo, gestión de riesgos, etc. Un mapa es la colección de

datos básica para registrar la localización, geometría, orientación, extensión y topología de elementos geológicos (Vasuki et al., 2014). Sin embargo, en la actualidad, la cartografía geológica de alta resolución sigue siendo generada mediante la interpretación de un experto, la base topográfica, la brújula, el navegador portátil y los datos de campo (Sang et al., 2020).

\*Autor para la correspondencia: [jcasas@uaeh.edu.mx](mailto:jcasas@uaeh.edu.mx)

Correo electrónico: [ju354755@uaeh.edu.mx](mailto:ju354755@uaeh.edu.mx) (A. Juárez Montiel), [maridj@gmail.com](mailto:maridj@gmail.com) (M. Díaz Jiménez), [jocesca@uaeh.edu.mx](mailto:jocesca@uaeh.edu.mx) (J. C. Escamilla-Casas), [edgar\\_uribe8920@uaeh.edu.mx](mailto:edgar_uribe8920@uaeh.edu.mx) (E. M. Uribe-Alcántara), [leoh@uaeh.edu.mx](mailto:leoh@uaeh.edu.mx) (L. E. Ortiz-Hernández), [silvia\\_montiel@uaeh.edu.mx](mailto:silvia_montiel@uaeh.edu.mx) (S. Montiel-Palma)

En algunos casos, se pueden generar mapas geológicos muy precisos gracias a las imágenes de alta resolución que

tradicional y a la que se genera mediante naves aéreas. Particularmente, el uso de VANT ha sido exitoso en la

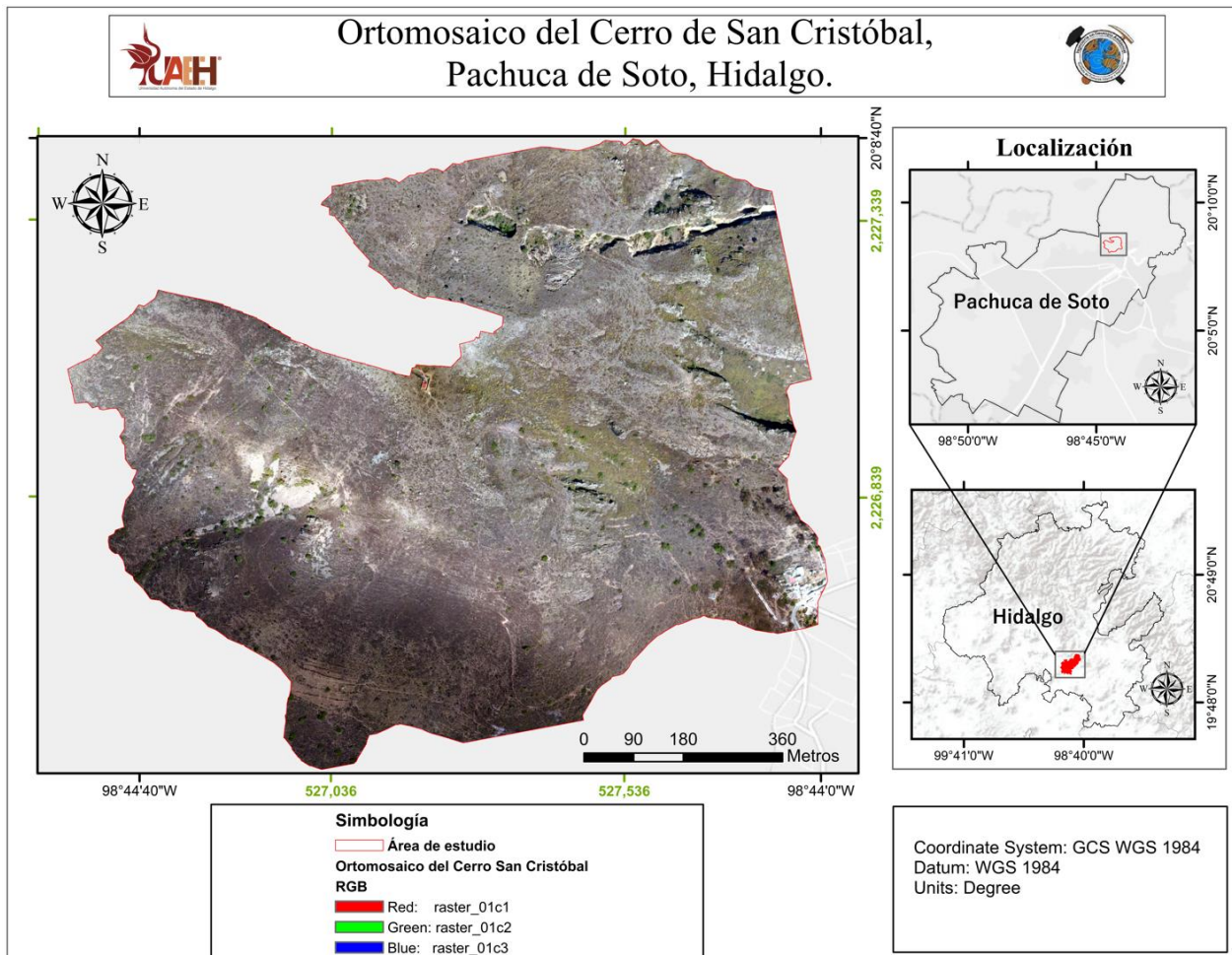


Figura 1: Ortomosaico del área de estudio (izquierda). Los recuadros muestran la ubicación del cerro de San Cristóbal con respecto a la ciudad de Pachuca y al estado de Hidalgo (derecha).

proporcionan las imágenes aéreas y/o satelitales (ASTER, Sentinel, SPOT, entre otras) en combinación con el desarrollo de técnicas de procesamiento de imágenes (Honarmand y Shahjriar, 2021). No obstante, el uso de imágenes, aéreas o satelitales de alta resolución, es limitado debido al alto costo y a la escasa disponibilidad de datos y/o cobertura.

Por otro lado, la fotogrametría es una técnica que captura información tridimensional de los rasgos del terreno a partir de dos fotografías del mismo objeto obtenidas desde ángulos diferentes (Donnovan y Lebaron, 2009; Linder, 2009). Adicionalmente, los criterios y principios fotogeológicos han sido fundamentales en la cartografía geológica (Guerra Peña, 1980, 2003).

Particularmente, la versatilidad de los drones como herramienta en la cartografía, radica en que están equipados con sensores ópticos, GPS y altímetro de presión barométrica, que permiten la obtención, a través de procesamiento fotogramétrico, de orto fotografías con muy alta resolución espacial, así como Modelos Digitales de Superficie y Elevación muy precisos (Lu y He, 2017; Manfreda et al., 2018).

En consecuencia, la fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (VANT) o drones está reemplazando a la cartografía

realización de la cartografía de zonas con poca accesibilidad (Heinecke et al., 2019; Ludwig et al., 2020, entre otros).

El objetivo del presente trabajo es demostrar la efectividad del uso de VANT en la cartografía geológica. Para ello, se presenta un mapa geológico preliminar de 101 ha de topografía agreste y poco accesible del sector sureste del cerro de San Cristóbal, al noreste de la ciudad de Pachuca (Figura 1). El mapa geológico se construyó en 26 horas de trabajo, ocho de vuelo de dron y dieciocho de trabajo en gabinete. La cartografía que se presenta muestra evidencias que sugieren tres tipos de litología y lineamientos topográficos, mismos que se interpretan como fallas geológicas.

### 1.1. Geomorfología y geología del área de estudio

El cerro de San Cristóbal es un positivo topográfico cuya cima rebasa los 2900 msnm, con un promedio de 400 m de desnivel con respecto a su base. La topografía forma pendientes que oscilan entre 55° y 90°, hacia la cima, y entre 5° y 15°, hacia la base (Ramón Melo, 2017).

La litología del cerro de San Cristóbal fue descrita inicialmente por Geyne et al. (1963) como una secuencia de tres formaciones terciarias, de la cima a la base, San Cristóbal,

Pachuca y Corteza, discordantes entre sí. Esta secuencia está compuesta predominantemente por depósitos de flujos piroclásticos y brecha tobácea, de carácter andesítico. Posteriormente, Sánchez Rojas et al. (2005) redefinen las secuencias en la Sierra de Pachuca y distinguen dos formaciones, la unidad TplQptB-Pc, basalto andesítico, que sobreyace discordantemente a la unidad ToA-BvA, andesita-brecha andesítica. Recientemente, Ortiz-Campa et al. (2016) describen las rocas del cerro San Cristóbal como muy variadas, encontrando andesita, andesita porfídica, andesita basáltica, andesita argilizada, brecha volcánica, dacita félsica, toba riolítica propilitizada, riolita y piroclastos. Particularmente, la cartografía reciente (Sánchez Rojas et al., 2005, 2007) indica que el Cerro de San Cristóbal está afectado por el sistema de fallas y vetas Santa Gertrudis.

## 2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del presente trabajo, se empleó un VANT cuyas características se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Características nominales de operación del VANT

Modelo	Autonomía de vuelo	Distancia entre dron y control
Inspire 1 Pro de DJI	15 min/1 batería	2 km

Las condiciones del área de estudio, tales como extensión, accesibilidad, desnivel entre la base y la cima, la topografía agreste, la predominancia e intensidad de los vientos obligaron a hacer ajustes en el plan de vuelo original del VANT (Figura 2). Por ejemplo, la distancia entre el dron y el control se redujo a 700 m y los vientos acortaron en un 30% los tiempos de operación de las baterías (Tabla 2). Por lo cual, se decidió usar como punto de lanzamiento el centroide del polígono, que es una zona donde se tiene la mayor elevación, lo cual disminuye los tiempos de vuelo y la distancia efectiva al control. Por lo tanto, para evitar daños en el VANT por el viento, el trabajo de campo se restringió a las primeras horas del día, realizándose la cobertura del área en dos sesiones de vuelo.

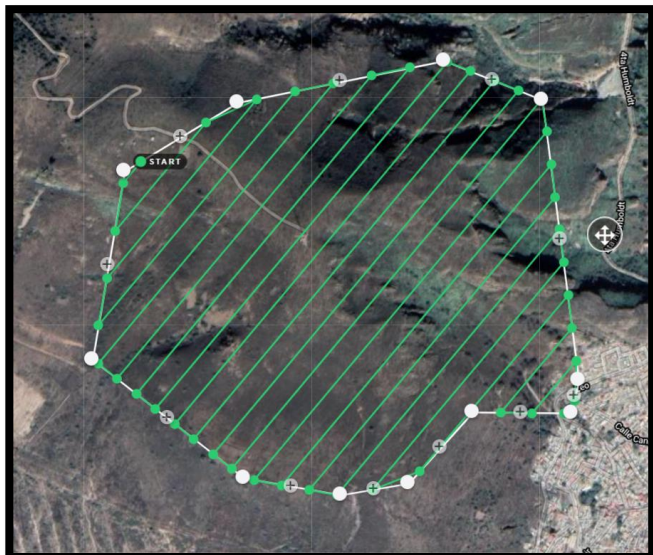


Figura 2: Planificación general de la campaña de vuelos. El punto “start” no fue el punto de lanzamiento sino el situado en el centro del polígono, ver Tabla 2.

El procesamiento de imágenes y la generación del ortomosaico se llevó a cabo utilizando una estación de trabajo con 10 procesadores activos (Intel Xeon @ 2.4GHz y 16 GB de memoria RAM), y una tarjeta de video NVIDIA Quadro K2200 de 5 núcleos @1124MHz y 4096MB de memoria (Figura 3).

Tabla 2: Características técnicas de vuelo.

Característica	Unidades
Extensión	101ha
Altitud de vuelo	120m
Traslape frontal de imágenes	75%
Traslape lateral de imágenes	65%
Dirección de vuelo (azimut)	130°
Velocidad de vuelo	12m/s
Coordenadas de inicio de todos los vuelos	98.7398 ° W 20.1401 ° N
Número de fotos (imágenes)	844

La interpretación geológica del ortomosaico se basó en los principios fundamentales y criterios de la interpretación fotogeológica (Allum, 1966; Guerra Peña, 1980, 2003). Las características que se consideraron para la determinación de contactos litológicos fueron el relieve, el color, la textura y el tono. Los lineamientos topográficos también fueron tomados en cuenta ya que sugieren la presencia de estructuras geológicas, tales como fallas. Finalmente, el tipo de drenaje se consideró para establecer con mayor certeza los límites litológicos.

## 3. Resultados

Mediante la aplicación de técnicas fotogeológicas, en el ortomosaico construido a partir de vuelos de dron, se identificaron tres tipos de litología y fallas geológicas (Figura 1 y 3, izquierda). En el ortomosaico, se distinguen tres tonos cromáticos predominantes, gris, rojo tenue y rosa los cuales se asocian, junto con la geomorfología y la textura, a cambios en el tipo de litología.

El primer tipo de litología que se identifica predomina en la porción norte y poniente del ortomosaico (Tipo 1, azul, Figura 3). Este tipo de litología presenta una textura y relieve heterogéneos, con topografía poco abrupta. Como característica principal del Tipo 1 son las estructuras de flujo, mismas que se observan en el extremo norte-central del ortomosaico y, muy probablemente, corresponden a derrames lávicos de carácter basáltico andesítico.

El Tipo 2 (verde, Figura 3) se observa en la porción suroeste y este del área de estudio. En el ortomosaico presenta una textura homogénea, relieve pronunciado y la topografía es abrupta hacia el flanco sur y se atenúa hacia la cima. La litología que se asigna al Tipo 2 es andesita. El tercer tipo de litología (Tipo 3, rosa, Figura 3) se distingue en el ortomosaico por una textura heterogénea, una topografía poco abrupta y con abundantes y marcadas estructuras circulares. Las estructuras circulares se asocian a colapso y son propias de materiales poco consolidados y rígidos, tales como depósitos de tefra o brechas volcánicas (Smellie et al., 2016). Por consiguiente, se interpreta una litología de brecha volcánica para el Tipo 3.

En el ortomosaico se observan tres lineamientos topográficos, los cuales son más visibles en la litología de Tipo 2. En los tres casos, se asocian con fallas. Se infiere que, por la traza casi recta de los lineamientos, se trata de fallas de inclinaciones muy

cercanas a la vertical. En la litología de Tipo 2 se observan, además, coloraciones blancas a grises claro, las cuales se interpretan como alteraciones de la roca o a intrusiones (diques).

verificación y constantes reinterpretaciones (Lisle et al., 2011). Sin embargo, la tecnología con la que fue creado permite una actualización inmediata y en tiempo real.

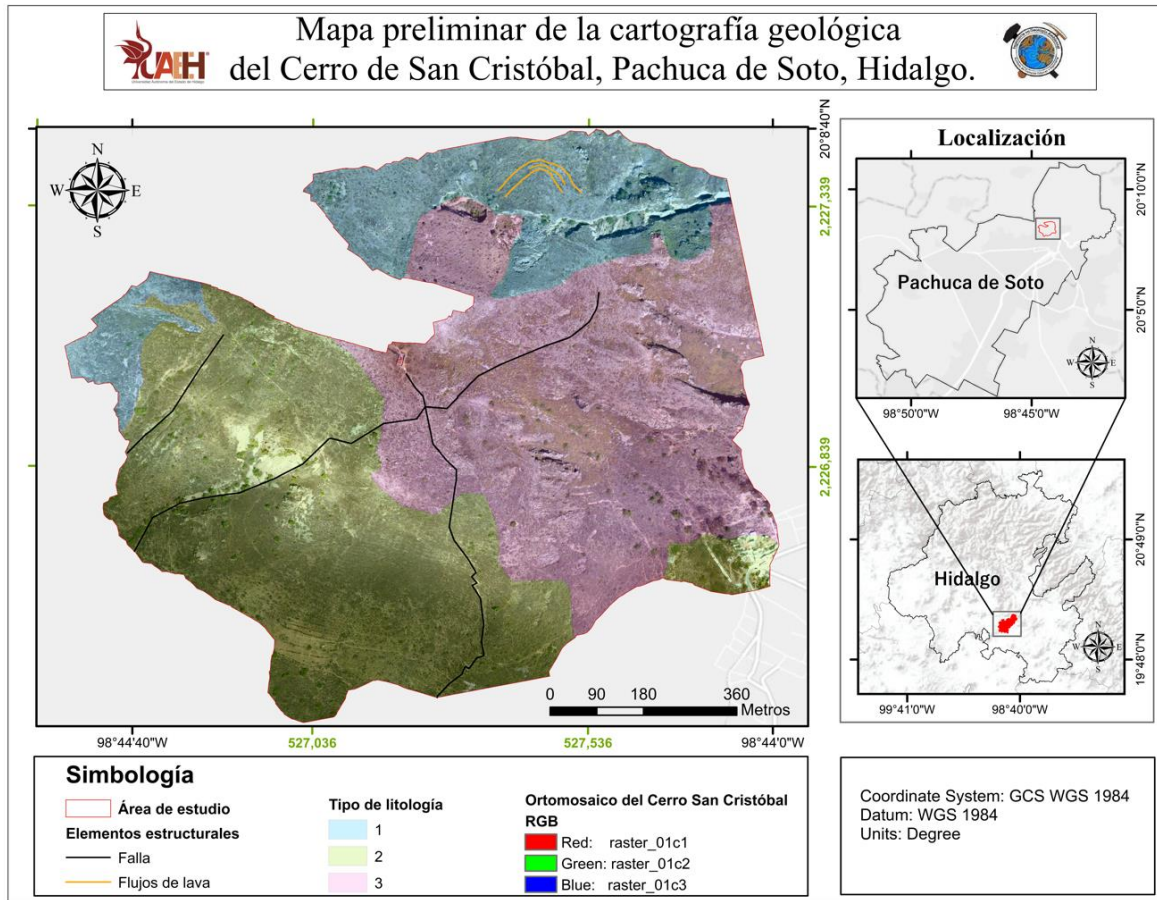


Figura 3: Ortomosaico del área de estudio (izquierda). Los recuadros muestran la ubicación del cerro de San Cristóbal con respecto a la ciudad de Pachuca y al estado de Hidalgo (derecha).

#### 4. Discusión

Las características topográficas y geomorfológicas del área de estudio, descritas por Ramón Melo (2017), son las ideales para probar la efectividad del uso del dron como herramienta en la cartografía geológica. En este trabajo, los tiempos de ejecución, desde la planificación de los vuelos, hasta la obtención del producto terminado, son notablemente menores con respecto a los que se requerirían en una cartografía geológica convencional, en la misma área.

Adicionalmente, el ortomosaico obtenido es un conjunto de datos que puede ser utilizado para fines más específicos, tales como generar un mapa de pendientes, estimar actitudes geológicas de los macizos rocosos, modelo del terreno, etc. (Belt & Paxton, 2005). A pesar de que el mapa geológico que se presenta es preliminar, posee una resolución de 10 cm, la cual es considerablemente mayor comparada con los mapas publicados por otros autores, (Geyne et al., 1963; Sánchez Rojas, et al., 2005). Por tanto, en el mapa de este trabajo se registran rasgos geológicos como contactos, estructuras y texturas en roca no registrados anteriormente.

Finalmente, el trabajo cartográfico que aquí se presenta, al igual que cualquier otro mapa geológico, está sujeto a

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado como parte del desarrollo de los proyectos de investigación: Mineralogía y geoquímica de un domo adakítico del municipio de Epazoyucan, Hidalgo, Mapa de Inundación para el Municipio de Tula, Hgo. y Caracterización de Intrusiones Magmáticas en el sureste de la Sierra de Pachuca.

#### Referencias

- Allum, J.A.E., (1966). *Photogeology and Regional Mapping*. Pergamon Press, Londres, Reino Unido.
- Belt, K., Paxton, S.T., (2005). GIS as an aid to visualizing and mapping geology and rock properties in regions of subtle topography. *Geological Society of America Bulletin* 117, 1-2, 149-160. DOI: 10.1130/B25463.1
- Donovan, J., Lebaron, A. (2009). A comparison of Photogrammetry and laser scanning for the purpose of automated rock mass characterization. Presented at the 43<sup>rd</sup> U.S. Rock Mechanics Symposium & 4<sup>th</sup> U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
- Geyne, A. R., Carl, F. J., Segerstrom, K., Black, R. F. y Wilson, I. F. (1963). *Geología y yacimientos minerales del distrito Pachuca-Real del Monte*.

- Estado de Hidalgo México. D.F, México: Consejo de Recursos Naturales no Renovables
- Guerra Peña, F., (1980). Fotogeología. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Guerra Peña, F., (2003). Las doce principales reglas de la interpretación fotogeológica y las bases fundamentales de que se derivan. *Investigaciones Geográficas* 50, 2-66.
- Honarmand, M., Shahjriai, H., (2021) Geological Mapping Using Drone-Based Photogrammetry: An Application for Exploration of Vein-Type Cu Mineralization. *Minerals* 11, 585. DOI:10.3390/min11060585.
- Linder, W. (2009). *Digital Photogrammetry (Vol. 1)*. Springer. Berlin Germany.
- Lisle, R.J., (2021). *Geological Structures and Maps a Practical Guide*. Butterworth-Heinemann, Elsevier. Cambridge, Ma, USA.
- Lisle, R. J., Brabham, P., Barnes, J. W., (2011). *Basic Geological Mapping (Geological Field Guide)*. Wiley-Blackwell, Oxford, United Kingdom.
- Lu, B., He, Y., (2017). Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing* 128, 73-85.
- Ludwig, M., Runge, C. M., Friess, N., Koch, T.L., Richter, S., Seyfried, S., Wraase, L., Lobo, A., Sebastia, M. T., Reudenbach, C., Naus, T., (2020). Quality Assessment of Photogrammetric Methods- A Workflow for Reproducible UAS Orthomosaics. *Remote Sensing* 12, 3831.
- Manfreda, S., McCabe, M., Miller, P., Lucas, R., Madrigal, V. P., Mallinis, G., Dor E. B., Helman, D., Estes, L., Ciralolo, G., et al., (2018). On the Use of Unmanned Aerial systems for Environmental Monitoring. *Remote Sensing* 10(4), 641. DOI: 10.339/rs10040641
- Ortiz Campa, A.M., Aguilar Díaz, J. M., Ángeles-Godínez, H.M., Ramos García, G.A., Díaz Ortiz, M.A., Del Ángel Trejo, L., Escamilla Casas, J. C., Castro Mora, J., Ortiz Hernández. L. E., (2016). Reconocimiento Geológico del Cerro San Cristóbal, Distrito Minero Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo. Presentado en el IX Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, CT-003. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
- Ramón Melo, M.L., (2017). Análisis Geomorfológico del Cerro San Cristóbal, y Cerro Cumbre Las Tres Marías, Pachuca de Soto, Hidalgo, México. Tesis. Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 114 pp.
- Sánchez Rojas, L. E., Arredondo Mendoza, J. A. and Cardoso Vázquez, E. A., (2005). Informe Técnico de la Carta Geológico-Minera Pachuca, F14D81 Escala 1:50,000, Estado de Hidalgo, Servicio Geológico Mexicano. Pachuca. 115 pp.
- Sánchez Rojas, L. E., Arredondo Mendoza, J. A. and Cardoso Vázquez, E. A., (2007). Carta Geológico-Minera Pachuca, F14D81 Escala 1:50,000, Estado de Hidalgo. Servicio Geológico Mexicano. Pachuca.
- Sang, X., Xue, L., Ran, X., Li, X., Liu, J., Liu, Z., (2020). Intelligent High-Resolution Geological Mapping Based on SLIC-CNN. *International Journal of Geo-Information* 9, 99, 1-23.
- Smellie J. L., Walker, A. J., Burgess, R., (2016). Complex circular subsidence structures in tephra deposits on large blocks of ice: Varda tuff cone, Öraefajökull, Iceland. *Bulletin of Volcanology* 78, 56.
- Vasuki, Y., Holden E., Kovesi, P., Mickethwaite, S., (2014). Semi-automatic mapping of geological structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences* 69, 22-3