

FOTOGRAMETRÍA DIGITAL, TÉCNICA DE APOYO DE MAPEO Y REGISTRO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE YAGUL, OAXACA

Vania Carrillo Bosch

Dirección de Registro Público de Monumentos
y Zonas Arqueológicas e Históricas
vania.carrillobh@gmail.com

Leobardo Daniel Pacheco Arias

Centro INAH Oaxaca
leobardo_pacheco@inah.gob.mx

RESUMEN

El propósito de este artículo es describir algunos de los beneficios aportados por el uso de herramientas y técnicas digitales, como la fotogrametría a partir de imágenes tomadas con dron y procesadas mediante *software* especializado. En esta ocasión se presenta la metodología empleada para el mapeo y registro tridimensional de la Zona Arqueológica de Yagul, en el Valle de Tlacolula, Oaxaca, sitio con declaratoria de Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Esta clase de modelos computacionales permiten a los arqueólogos obtener datos métricos y geométricos precisos de los monumentos arqueológicos y pueden ayudar en la conservación y difusión del patrimonio cultural.

PALABRAS CLAVE

FOTOGRAMETRÍA, MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN, IMÁGENES AÉREAS, DRON, YAGUL

ABSTRACT

The purpose of this article is to describe some of the benefits implemented with the use of digital tools and techniques such as photogrammetry, which takes images with a drone and process them through specialized software. We present the employed methodology for the tridimensional mapping and registry of the Archeological Site of Yagul, located in Tlacolula Valley in Oaxaca, site declared as World Heritage by the UNESCO. The archaeologists with these kind of models get accurate metric and geometric data of the components of the archaeological site that help with the conservation and diffusion of cultural heritage.

KEY WORDS

PHOTOGRAMMETRY, DIGITAL ELEVATION MODEL, AERIAL IMAGES, DRONE, YAGUL

INTRODUCCIÓN.

LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE YAGUL COMO PATRIMONIO CULTURAL

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) establece en la Convención para la Protección del Patrimonio Mundial Cultural que el Patrimonio Cultural está constituido por las “obras del hombre u obras conjuntas del hombre y naturaleza así como las zonas incluidos los lugares arqueológicos que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista histórico, estético, etnológico o antropológico” (UNESCO 1972:2).

Actualmente están registrados 27 sitios de México dentro del Listado de Patrimonio de la Humanidad Cultural de la UNESCO; la Zona Arqueológica de Yagul fue inscrita en 2010 (UNESCO 2019).

Las autoridades responsables para el manejo de la Zona Arqueológica son la Comisión de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), dependencia a la que le corresponde la “conservación y restauración del patrimonio cultural arqueológico e histórico” (Cámara de Diputados 2015:1). Posteriormente se incorporó el Corredor Arqueológico del Valle de Oaxaca, que está dedicado a la difusión de las actividades e información de la Zona Arqueológica.

Los órganos que respaldan la zona nos indican que es de suma importancia la conservación y protección del sitio, para esto es conveniente desarrollar estudios e investigación científica y técnica que permitan enfrentar los peligros que amenazan al patrimonio cultural, entre ellos el turismo que se ha promovido como estrategia nacional de desarrollo; éste puede dañar de manera irreversible los recursos culturales y naturales (Robles y Corbett 2001).

La UNESCO recomienda altamente la técnica de la fotogrametría como herramienta para la catalogación de monumentos y sitios (Buill 2013). El objetivo de este artículo es mostrar la implementación de la técnica de la fotogrametría para elaborar un registro y mapeo arqueológico, generando en el proceso documentación precisa y fungiendo como método de apoyo para la conservación y difusión de la Zona Arqueológica de Yagul.

ZONA ARQUEOLÓGICA DE YAGUL

Yagul se encuentra en uno de los tres valles centrales de Oaxaca, conocido como el de Tlacolula. Destacan cuevas y abrigos rocosos, donde se observan representaciones de pintura rupestre y conjuntos arquitectónicos prehispánicos monumentales, funerales, habitacionales y defensivos (Robles 2010).

El paisaje natural rocoso ubicado en los alrededores de los conjuntos arquitectónicos prehispánicos son formaciones geológicas que integran una serie de cuevas que fueron utilizadas por grupos nómadas de cazadores y recolectores que habitaron hace 10,000 años (Robles 2016). Flannery (1986) demostró que en esa época se inició un proceso de experimentación de plantas, lo que permitió alcanzar las condiciones fundamentales para el desarrollo de la civilización, a través de la domesticación de las plantas y animales que dieron origen a la dieta mesoamericana; esto permitió que grupos de cazadores y recolectores se asentaran en la región y en el sitio (Robles 2010; Robles y Martínez 2011).

El sitio arqueológico de Monte Albán fue abandonado a finales de la época denominada Monte Alban III-B (Blomster 2008; Feinman y Nicholas 2011, 2016), lo que permitió el surgimiento de otras comunidades que se fortalecieron al desaparecer el poder hegemónico del centro rector, empezando a regirse de manera autónoma. Yagul

no fue una excepción, pues diversos autores (Bernal y Gamio 1974; Fahmel 2005; Paddock 1955) reportan ocupación a partir de la época de Monte Albán I y señalan que el auge de la zona se dio entre 900 y 1200 d.C., en la llamada época Monte Albán IV, después de la caída de la ciudad de Monte Albán. En este momento, Yagul alcanzó su máximo nivel arquitectónico, refinando las plantas arquitectónicas, la decoración con la utilización de piedra volcánica, el uso de la planta rectangular de tres accesos para el uso habitacional (Lind 2015; Robles 2016).

Se estima que Yagul llegó a contar con una densidad demográfica de alrededor de 6,300 habitantes (Kowalewski et al. 1989:321), contando con un área ceremonial y cívica asentada en la parte superior de la colina, la cual permitió ubicar al sector residencial en la llanura y a faldas de la colina.

La actividad del sitio fue más relevante durante la época Monte Albán IV, con una fuerte influencia mixteca que puede apreciarse en los cambios en la arquitectura del sitio (Flannery y Marcus 1986). Hacia 1521, el sitio del Valle del Tlacolula fue impactado por el movimiento de las tropas españolas, más conocido como Conquista (Joyce 2010).

El sitio de Yagul fue explorado entre la década de 1950 y 1960, cuando los investigadores John Paddock (1955), Ignacio Bernal y Lorenzo Gamio (1974) encontraron estructuras que se distribuyen en diversos planos, agrupándose en tres áreas principales: el centro cívico, la fortaleza y la zona habitacional.

Gracias a la investigación arqueológica que destacó la importancia de Yagul, el sitio fue considerado como Patrimonio Cultural de la Humanidad. A continuación se abordará desde una perspectiva de investigación diferente, la cual elaboró el registro del área cívico-ceremonial, desarrollada en el periodo Posclásico, través del uso de las nuevas tecnologías.



FIGURA 1.
Fotografía capturada con el dron de la Zona Arqueológica de Yagul.

PERCEPCIÓN REMOTA

La percepción remota se define como el conjunto de técnicas que permiten obtener datos de la superficie terrestre, sin tener contacto con ésta, con la ayuda de dispositivos conocidos como sensores (Lillesand et al. 2008; Cámara 2005:1). Su clasificación se conforma de dos tipos y es considerada de acuerdo a la procedencia de energía que operan (Parcak 2009; Wiseman y El-Baz 2007). El tipo activo es capaz de emitir su propia energía y de reconcentrar en la superficie lo que se observa. La ventaja de éste es que puede operarse en la noche y con nubosidad. El sensor más conocido que trabaja con esta energía es el *LIDAR*. El tipo pasivo recolecta la energía electromagnética que reflejan los rayos solares; los ejemplos comunes de este sensor son las imágenes satelitales y las fotografías aéreas.

IMÁGENES SATELITALES

La percepción remota se ha vuelto la técnica que permite adquirir imágenes desde sensores de alta resolución instalados dentro de satélites. La plataforma trabaja enviando ondas de energía a la superficie terrestre y, al mismo tiempo, captura la energía reflejada para establecer las distancias y características que la componen. Algunos ejemplos de satélites que generan estas imágenes son: *Landsat*, *Sentinel* y *Spot*.

Landsat

Las imágenes satelitales son una buena herramienta que nos puede ayudar a comprender los cambios naturales y culturales que presenta la superficie del terreno. Existen instituciones que nos brindan esta información, como el Servicio Geológico de Estados Unidos, donde a través de su plataforma en línea pueden obtenerse imágenes captadas por los satélites *Landsat* de forma gratuita.

Landsat es una serie de satélites estadounidenses de percepción remota. Fueron creados para la observación de los recursos terrestres. El primer satélite, denominado *Landsat 1*, fue lanzado en 1972. En el año 2013 el satélite *Landsat 8* fue lanzado, siendo

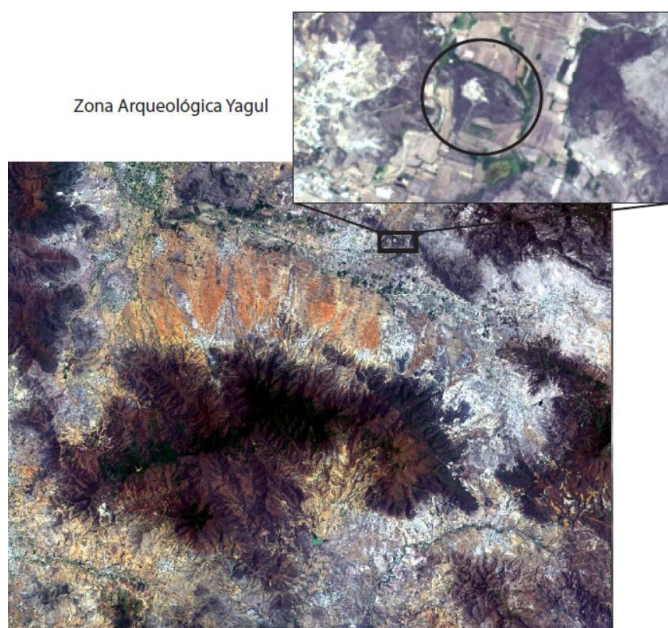


FIGURA 2.
Imagen satelital *Landsat 8*.

el último de la serie, y el cual incorporó instrumentos como el sensor *Operational Land Imager* (OLI), el cual cuenta con nueve bandas espectrales que se combinan en distintas formas para la obtención de variadas composiciones de color y estadísticas. Las imágenes de las nueve bandas espectrales pueden llegar a tener una resolución espacial de 30 m por px.

La imagen obtenida por los sensores del *Landsat 8* fue capturada el día 21 de abril de 2019, proyectada con el datum wgs84; la imagen abarca casi todo el estado de Oaxaca, con una resolución de 30 m por px (Figura 2). La potencia y calidad de las imágenes satelitales son aptas para el análisis geográfico del estado y así comprender los elementos naturales que rodean al sitio. Por ejemplo, esta imagen nos puede ayudar a conocer la hidrología que rodea la zona arqueológica, para así comprender el proceso de domesticación de las plantas y animales, base que dio fundamentos para el desarrollo de una civilización. Sin embargo, la imagen no es suficiente para analizar detalladamente el terreno en particular que se pretende estudiar.

INEGI

En México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ofrece, dentro de su plataforma en línea, gran variedad de datos geográficos de manera gratuita entre los que destacan imágenes de las cartas topográficas, cartas topográficas vectorizadas, nubes de puntos, modelos digitales de elevación y ortofotos.

Los ortofotos muestran la totalidad de los rasgos visibles en el terreno, donde todos los elementos presentan la misma escala y están libres de errores y deformaciones. Una ortofoto se compone de varias imágenes que han sido ortorrectificadas para tener una proyección ortogonal obteniendo las propiedades geométricas de un plano (INEGI 2019a).

La Figura 3 (ortofoto compuesta por diversas imágenes) fue obtenida a través de la plataforma en línea de INEGI; tiene una escala de 1:20,000, corresponde a la clave topográfica E14D58b, pertenece a la carta con el nombre Tlacolula de Matamoros, está proyectada con el datum ITR92 y fue creada en 1999; su resolución es de 15 m por px. Es un buen elemento de registro arqueológico, pero el formato en blanco y negro

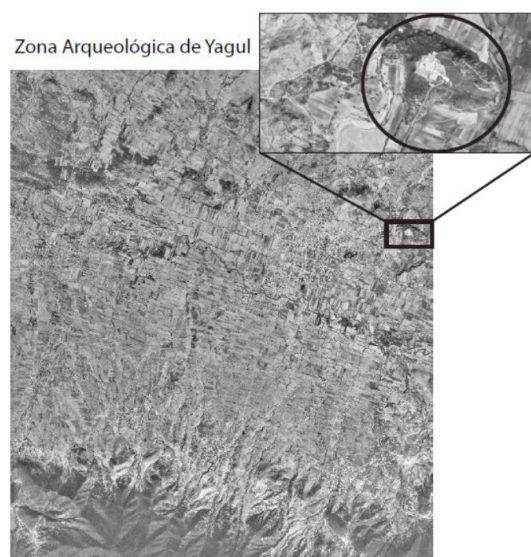


FIGURA 3.
Ortofoto INEGI de escala 1:20,000.

que presenta lo vuelve una herramienta difícil de usar para la detección de estructuras arquitectónicas en el sitio, además de tener una resolución inferior en comparación con nuevas tecnologías de captura de imágenes aéreas.

MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

El modelo digital de elevación (MDE) es una representación de las elevaciones sobre el área estudiada mediante valores numéricos. Generalmente muestra una forma simplificada de la geometría de la superficie del terreno. Un terreno contiene una serie de puntos con coordenadas donde x y y se relacionan a la variable con la localización geográfica, mientras z representa la altitud del terreno.

MDE INEGI

Del INEGI, como ya antes se mencionó, se obtuvieron de forma gratuita los modelos digitales de elevación. Para el área de interés que representa este trabajo solamente se encontraron dos archivos MDE correspondientes a las escalas de 1:50,000 y 1:10,000.

A continuación, se analizan ambos MDE, tomando en cuenta que la naturaleza de su creación es distinta y, por lo tanto, su viabilidad de uso para el presente estudio es limitada.

El primer MDE, con escala 1:50,000, consiste en una imagen que tiene el contenido de la carta topográfica. Su edición es mediante la conversión de curvas de nivel del mapa topográfico de dicha escala, y se trabajó mediante procesos digitales a partir de datos vectoriales (INEGI 2019b). Presenta la clave topográfica E14D58, con el nombre Tlacolula de Matamoros, está proyectada con el datum ITRF92 y fue generada en 2003 (Figura 4). Se puede observar en gran dimensión la geometría de la superficie del terreno que presenta el área en donde se encuentra ubicada la zona arqueológica. Se perciben varios conjuntos de lomas ubicados al sur, este y oeste del sitio arqueológico, y al norte se detecta una planicie que es el espacio donde se encuentran asentadas las poblaciones modernas que no están representadas en el MDE. Nos permite distinguir de manera somera que Yagul se desarrolló en la parte superior de una colina, de la que no se distingue su forma y que del lado oeste pasa el río Seco, aunque no se alcanza a observar con claridad su cauce. La escala en la que se proyecta el modelo es amplia y cuenta con una resolución de 50 m por px, que indica que este MDE no es útil para el registro de un sitio arqueológico, ya que no nos permite identificar los asentamientos prehispánicos, pero nos puede brindar información para entender el terreno.

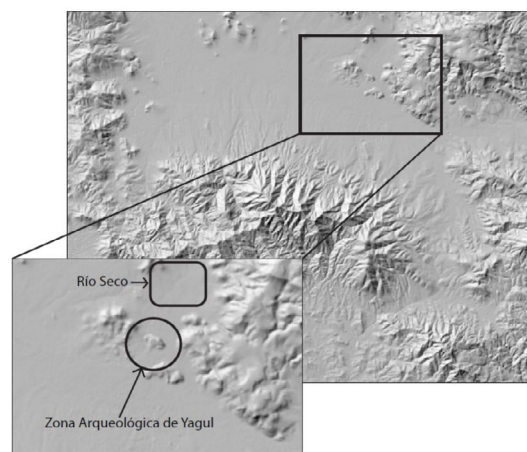


FIGURA 4.
Modelo digital de elevación de
escala 1:50,000.

El segundo MDE, de escala 1:10,000 fue creado mediante la aplicación de procesos de orientación y correlación fotogramétrica de las imágenes ópticas obtenidas de un satélite en modo estereoscópico (INEGI 2019c). El área cubierta se basa en el formato cartográfico con la escala ya antes mencionada. Cuenta con la clave topográfica E14D58B2, pertenece a la carta con el nombre de Tlacolula de Matamoros, está proyectada con el datum ITR08 época 2010 y fue creada en 2017 (Figura 5). Podemos observar una disminución de cantidad de conjuntos de lomas, ya que tiene una cobertura territorial de menor rango a comparación de la Figura 4. En él se percibe la carretera federal 190, el asentamiento de las poblaciones modernas, y el cauce y grosor del río Seco. En cuanto a la zona arqueológica, se distingue el abrigo rocoso llamado La Fortaleza que corresponde al área más elevada de la colina; además se aprecian nivelaciones, patios y algunas estructuras prehispánicas. Este modelo es de mayor ayuda, pues gracias a su resolución de 5 m por px (derivado de los sensores remotos satelitales), se pueden distinguir evidencias arqueológicas. Este MDE puede ser una herramienta efectiva para el registro arqueológico, no obstante, es insuficiente para realizar un levantamiento topográfico.

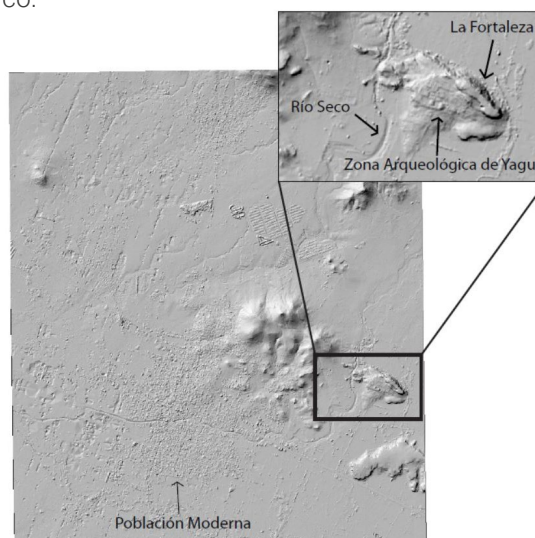


FIGURA 5.
Modelo digital de elevación de
escala 1:10,000.

FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría tiene por objetivo “estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto” (Bonneval 1972). Se apoya de los principios de la topografía, en donde se determinan direcciones en el espacio y se definen mediante la posición de elementos de un cuerpo (Medina 2014); la obtención de esas direcciones es adquirida mediante fotografías, en lugar de un equipo topográfico.

La fotografía “es un sistema de registro automático de imágenes perspectivas cónicas, basadas en la intersección de un haz cónico de rayos proyectivos, con un plano de proyección donde la imagen queda registrada. La técnica de la fotogrametría se apoya de la fotografía, donde a partir de un par de imágenes fotográficas de un mismo objeto, conocidas su posición y orientación, es posible calcular los rayos proyectivos de cada una correspondientes a un mismo punto de dicho objeto” (Talaverano 2014). Lo anterior necesita de conocer los puntos de proyección de las imágenes capturadas, relacionando la posición y orientación de la cámara para posteriormente reconstruir

los rayos proyectivos y obtener la proyección de cada punto, creando un modelo fotogramétrico.

Dentro de esta técnica existen tres tipos. La fotogrametría analógica desarrollada de 1900 a 1960. La fotogrametría analítica empleada de 1960 a 1980. Y la fotogrametría digital utilizada a partir de 1980 hasta la actualidad (Pérez 2001).

La técnica de la fotogrametría digital se desarrolla a través de imágenes digitales, donde una fotografía es considerada como un mapa de píxeles. El mapa de píxeles es la base donde cada punto está codificado unitariamente y ordenado en el espacio (Medina 2014). La aplicación de la fotogrametría hace que un pixel corresponda a un punto, donde este punto obtendrá un valor numérico para así descifrar su posición en un espacio. El empleo de esta técnica nos permite obtener nubes de puntos que pueden ser utilizados para crear modelos tridimensionales, modelos digitales de elevación y ortofotos. Estos modelos nos permiten una mejor visualización del área de estudio.

En los últimos años la fotogrametría se ha convertido en una técnica de registro desarrollada en la arqueología, donde es empleada para la creación de modelos tridimensionales de objetos, registro de secuencias estratigráficas dentro una excavación y levantamiento topográfico de un sitio (Acosta 2017; Domínguez et al. 2017; Gudiño et al. 2018; Kabata et al. 2016).

Dron

La fotogrametría puede ser auxiliada con el sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS, por sus siglas en inglés), mejor conocido como dron, el cual ha adquirido una gran fama por ser un nuevo concepto en el ámbito aeronáutico. Este sistema es una novedad tecnológica que proporciona nuevas y mejores aplicaciones civiles y de uso comercial (Dirección General de Aeronáutica Civil 2017). Se trata de una herramienta que se usa con mayor frecuencia para la investigación, pues facilita el trabajo en distintos contextos, como la adquisición de imágenes aéreas para el desarrollo de la técnica fotogramétrica.

Para nuestro trabajo se utilizó el dron *Phantom 3 Standard* de la marca DJI, que fue operado mediante la aplicación *DJI GO*, desde un dispositivo portátil Ipad mini 2. La aplicación *DJI GO* es la aplicación fundamental que ayuda a conectar los diferentes dispositivos con el RPAS, aparte nos permite manejar el vehículo aéreo y captura imágenes y video de forma manual.

Normalmente los vuelos realizados con este dron se elaboran con la aplicación *DJI GS Pro*, ya que nos ayuda a planificar y manejar los vuelos automáticos capturando imágenes con los parámetros necesarios dentro del área de estudio. En el sitio se determinó no usar dicha aplicación, debido a que una actualización de la aplicación realizada en esas fechas provocó un error en su uso.

En campo se estableció el lugar de vuelo del lado oeste de la Zona Arqueológica de Yagul, que corresponde al área donde se localiza la mayor concentración de elementos arquitectónicos, en una extensión de 13 hectáreas. Se realizaron cinco vuelos con una altura promedio de 72.8 m, obteniendo un total de 452 imágenes, que fue el total registrado. Las imágenes fueron procesadas con *Agisoft PhotoScan Professional*, Versión 1.4.3 build 6529, de uso educativo, para generar una reconstrucción tridimensional del entorno mediante la combinación de técnicas fotogramétricas.

Las Figuras 6 y 7 fueron generadas con los elementos antes descritos y procesadas fotogramétricamente, obteniendo una ortofoto y un MDE del sitio de estudio.

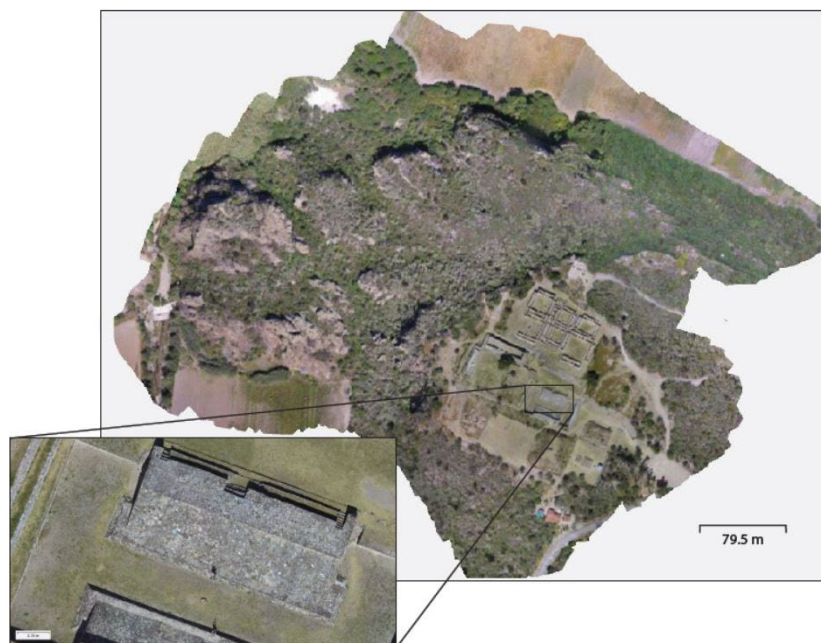


FIGURA 6.
Ortofoto elaborada con las imágenes capturadas con el dron. Resolución de 2.55 cm por px. Nótase la excelente resolución que nos permite identificar los materiales que componen al sitio y sus características arquitectónicas.

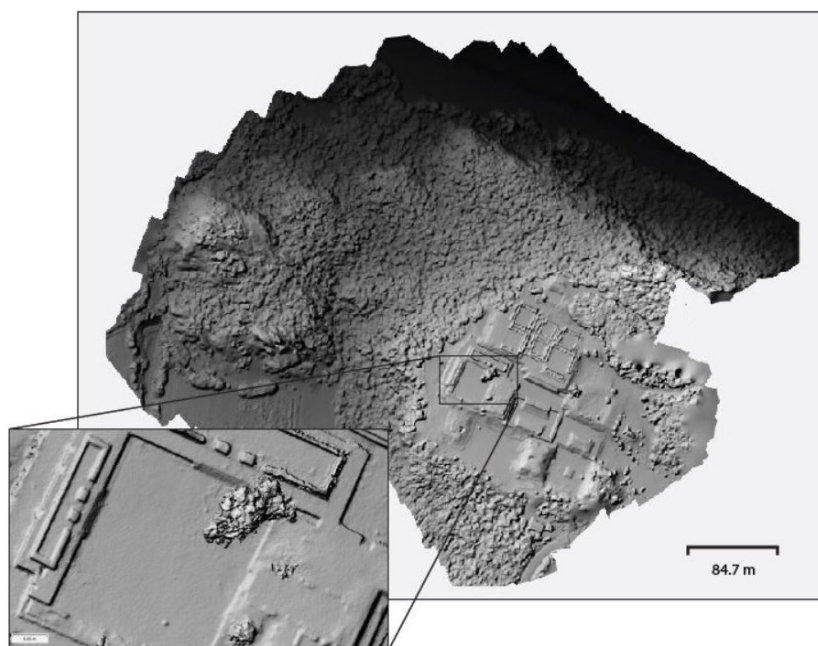


FIGURA 7.
Modelo digital de elevación elaborado con las imágenes capturadas con el dron. Resolución de 10.2 cm por px. Observamos de manera más exacta la composición de la zona arqueológica y la superficie del terreno. Este modelo puede ser exportado a *software* especializado para generar planos topográficos, curvas de nivel, entre otros.

EVALUACIÓN DE TÉCNICA PARA LA ELABORACIÓN DE UN REGISTRO

En el presente escrito se presentaron tres imágenes aéreas que corresponden a: imagen satelital *Landsat 8*, ortofoto procesada por INEGI y ortofoto generada por la técnica de fotogrametría con imágenes capturadas con un dron.

La imagen aérea *Landsat* presenta una resolución de 30 m, pero consideramos que no ayuda a registrar un sitio arqueológico, pues no nos permite identificar terrenos y elementos arquitectónicos (Figura 8b). Por otro lado, la imagen *Landsat*, al abarcar casi todo el territorio del estado de Oaxaca, es buen elemento para entender eventos geográficos que suceden en su delimitación. Así mismo, nos puede ayudar para el análisis de la superficie del terreno con la ayuda de la hidrología, agronomía y otras ciencias, y así comprender cómo la superficie del terreno del Valle de Tlacolula fue apta para la domesticación de las plantas y animales, fundamentos para el desarrollo de una civilización.

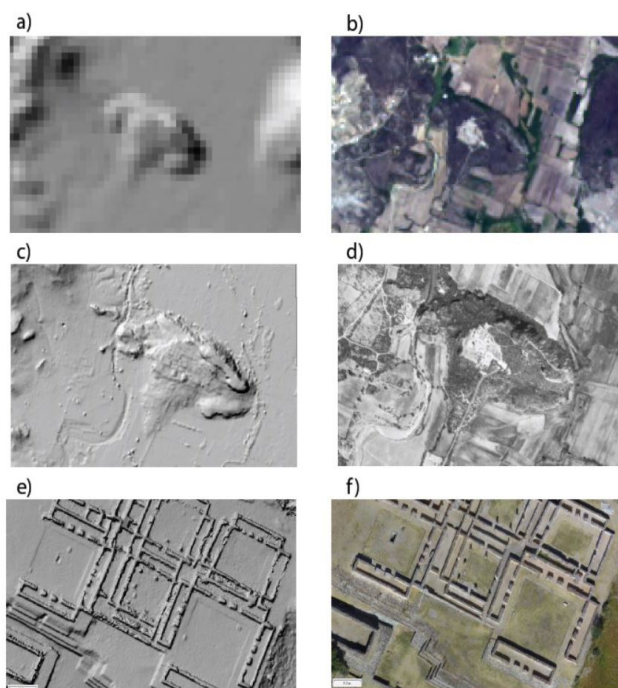
La ortofoto adquirida por la plataforma de INEGI tiene una resolución de 15 m, donde apreciamos algunos elementos arquitectónicos y la forma de la loma donde se asienta Yagul. Consideramos que esta imagen puede ayudar para el registro de un sitio arqueológico, pero debemos tener en cuenta que la ortofoto se presenta con escala de grises, dificultando la apreciación de los rasgos arqueológicos (Figura 8d).

La tercera ortofoto, obtenida con la técnica de la fotogrametría, cuenta con una resolución de 2.55 cm, permitiendo detectar de forma clara los rasgos arqueológicos que componen el sitio (Figura 8f). Esto nos confirma la efectividad del documento como elemento de registro, además de facilitar la detección de detalles que resultan difíciles de reconocer en un recorrido y apreciar si el sitio ha sufrido daños o deterioros en sus estructuras.

Posteriormente se generaron tres MDE con diferentes escalas que corresponden a 1:50,000, 1:10,000 (INEGI) y el generado a través de la captura de imágenes con el dron.

El MDE con la escala de 1:50,000 tiene una resolución 50 m por px. Las muestras nos indican que no es eficiente para el registro de un sitio arqueológico ya que no permite detectar los asentamientos (Figura 8a), pero sí puede ser utilizado para elaborar un análisis del terreno de toda el área que atiende el Corredor Arqueológico del Valle de Oaxaca.

FIGURA 8.
Modelos tridimensionales.
a) MDE con escala 1:50,000;
b) Imagen *Landsat 8*;
c) MDE con escala 1:10,000;
d) Ortofoto INEGI con escala 1:20,000;
e) MDE generada con las imágenes capturadas por el dron;
f) Ortofoto generada con las imágenes capturadas por el dron.



El modelo de 1:10,000 es eficiente para identificar estructuras prehispánicas, además de otorgar un acercamiento para entender la superficie y elementos naturales que se localizan alrededor del sitio (Figura 8c).

Sin embargo, el modelo que nos ofrece mejor información es el creado a través de la fotogrametría, que a partir de la captura de imágenes con el dron nos ayuda a obtener un mejor registro sobre cómo se encuentra la zona arqueológica actualmente (Figura 8e). Debe tomarse en cuenta que este MDE es versátil, pues con la ayuda de *software* especializado nos permite crear planos de levantamientos topográficos.

Finalmente, al retomar los elementos ya evaluados, ortofotos y MDE, podemos realizar una forma adicional del estudio del sitio: modelos tridimensionales. El primero fue elaborado con la combinación de la imagen Landsat y el modelo digital de elevación con escala 1:50,000 donde nos permite sólo detectar las elevaciones que presenta el Valle de Tlacolula (Figura 9a).

El segundo modelo fue creado con la ortofo INEGI y el MDE con escala 1:10,000, donde se observa un mejor modelo en tres dimensiones, pues en este se representa el cauce del río, las elevaciones y formas de los cerros. Cabe mencionar que es un buen modelo para mostrar la totalidad de la superficie del terreno. Podemos destacar que no es factible la detección de elementos arqueológicos debido a la escasa visualización (Figura 9b).

En último lugar, el tercer modelo fue generado con las imágenes obtenidas por medio del dron y procesadas con la técnica de fotogrametría, en donde podemos detectar los principales elementos arquitectónicos del sitio, rasgos no visibles a nivel de suelo, superficie del terreno y mejor enfoque de la composición del mismo (Figura 9c).

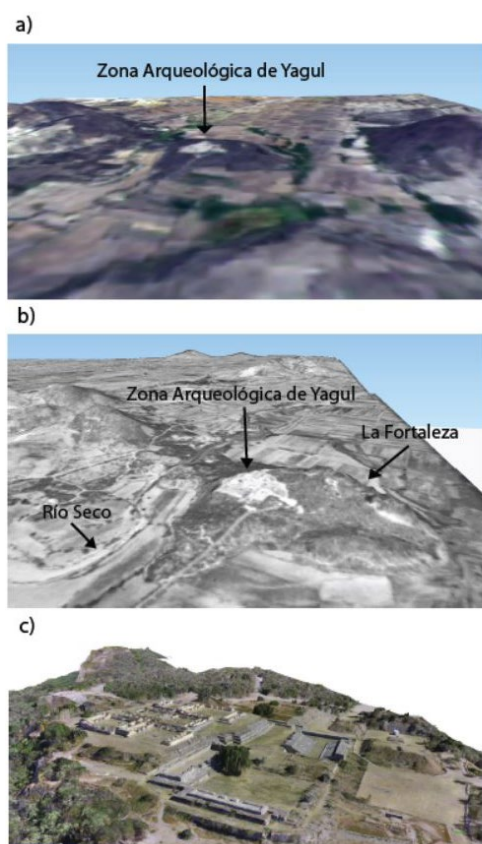


FIGURA 9.
Modelos tridimensionales. a) Generado con la imagen Landsat y el modelo digital de elevación con escala 1:50,000; b) Combinación de la ortofo INEGI y el MDE con escala 1:10,000; c) Elaborado con las imágenes obtenidas con el dron y procesadas con la técnica de fotogrametría.

CONCLUSIÓN

Después de haber realizado la evaluación de las diferentes técnicas para la elaboración del registro de un sitio arqueológico podemos determinar que la fotogrametría es una de las mejores opciones para estos fines, debido a que proporciona información de buena calidad para el análisis de superficie del terreno, como se ha visto en renglones anteriores. Nos auxilia en la identificación de elementos deteriorados, áreas de necesidad de mantenimiento y accesos no identificados de manera oficial. Así mismo, puede representar una herramienta de apoyo para la conservación y preservación del sitio arqueológico, en el caso de la Zona Arqueológica de Yagul, del patrimonio cultural.

El análisis fotogramétrico nos ofrece la posibilidad de realizar comparaciones cronológicas del mismo sitio a través de la generación de elementos de información (ortofoto, modelo de digital de elevación, modelo tridimensional), para la visualización de las necesidades que puede presentar la zona, como la atención a estructuras en deterioro, crecimiento de vegetación que afecten dichas estructuras o planeación de posibles estrategias de mantenimiento en relación del sitio con el entorno.

Una ventaja de esta técnica es la creación de los modelos tridimensionales que muestra una visualización óptima y de calidad, además de fomentar la difusión, en este caso como adición a las actividades que realiza el Corredor Arqueológico del Valle de Oaxaca. Sin embargo, se debe de considerar que la elaboración de estos modelos y su interpretación presenta un costo, a comparación de los modelos que se obtienen de la información que brindan plataformas gratuitas. Además, en áreas con densa vegetación puede omitir cierta información al no tener la capacidad de penetrar dichas áreas.

Fuera del contexto arqueológico, la fotogrametría es de gran ayuda para realizar levantamientos topográficos, pues con los elementos descritos y una buena interpretación se puede llevar a cabo de forma más precisa y a un costo menor.

Finalmente, es de suma importancia señalar que la fotogrametría es una técnica que genera diferentes documentos para la interpretación y posterior investigación; no pretende englobar una investigación arqueológica, sino que se trata de una herramienta de soporte.

REFERENCIAS

Acosta, Guillermo, Emily McClung, Gerardo Jiménez y Víctor Hugo García

- 2017 El empleo de fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT/dron) como herramientas de evaluación del patrimonio en riesgo: chinampas arqueológicas de Xochimilco. *Revista Española de Antropología Americana*. 47:185-197.

Bernal, Ignacio y Lorenzo Gamio

- 1974 *Yagul, el palacio de los seis patios*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas, México.

Blomster, Jeffrey

- 2008 *After Monte Alban: Transformation and Negotiation in Oaxaca, Mexico*. University Press of Colorado, Boulder.

Bonneval, Henri

- 1972 *Photogrammétrie Générale*. Eyrolles, París.

Buill Pozuelo, Felipe

- 1960 Técnica de levantamiento fotogramétrico de estructuras antiguas: ejemplo de las murallas de Barcelona y Alepo. Actas del XXXIV *Curset: Jornadas Internacionales sobre la intervención en el Patrimonio Arquitectónico*, pp. 81-86. Barcelona y Tortosa.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión

- 2015 Ley Orgánica del Instituto Nacional de Antropología e Historia. Documento electrónico: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/170_171215.pdf, accesado el 4 de octubre de 2018.

Cámara Sánchez, Alejandro Óscar

- 2005 Método contextual para fusión de datos. Tesis de maestría, Programa de maestría y doctorado en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Dirección General de Aeronáutica Civil

- 2017 Circular obligatoria que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano. Documento electrónico: <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC-archivo/modulo3/co-av-23-10-r4.pdf>, accesado el 4 de mayo de 2019.

Domínguez Pérez, Cuauhtémoc, Javier Martínez González, Laura Castañeda Cerecero y Alberto Mena Cruz

- 2017 Drones, fotogrametría y arqueología en México. Principios y ejemplos. *Arqueología*. 52:187-215.

Fahmel Beyer, Bernd

- 2005 Yagul, introducción. *La pintura mural prehispánica en México: Oaxaca*. Coordinado por Beatriz de la Fuente y Bernd Fahmel Beyer, pp. 236-240, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Estéticas, México.

Feinman, Gary M. y Linda M. Nicholas

- 2011 Monte Albán: una perspectiva desde los límites del valle de Oaxaca. En *Monte Albán en la Encrucijada regional y disciplinaria: Memoria de la Quinta Mesa Redonda de Monte Albán*, editado por Nelly Robles García y Ángel Iván Rivera Guzmán, pp. 241-284, Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- 2016 Reconsiderando la "invasión mixteca" del valle de Oaxaca en el Posclásico. *Anales de Antropología*, 50:247-265.

Flannery, Kent V.

- 1986 *Guila Naquitz: Archaic Foraging and Early Agriculture in Oaxaca, Mexico*. Academic Press, Nueva York.

Flannery, Kent V. y Joyce Marcus

- 1983 *The Cloud People Divergent Evolution of the Zapotec and Mixtec Civilizations*. Academic Press, Nueva York.

Gudiño Maussán, José L., Felisa J. Aguilar y René Hernández Rivera

- 2018 Aplicación de fotogrametría digital para el registro de las huellas de dinosaurio de la Formación Cerro del Pueblo (Campaniano tardío), Coahuila, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 70(2):307-324.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía

- 2019a Ortofoto digital E14D58b escala 1:20 000: Tlacolula de Matamoros con resolución de 1.5 metros. Documento electrónico: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463342922> , accesado el 1 de junio de 2019.
- 2019a Modelos digitales de elevación: Tlacolula de Matamoros. Documento electrónico: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825734381> , accesado el 1 de junio de 2019.
- 2019a Modelos digital de elevación tipo superficie con 5 m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados: E14D58B2. Documento electrónico: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463610595> , accesado el 1 de junio de 2019.

Joyce, Arthur A.

- 2010 *Mixtecs, Zapotecs, and Chatinos: Ancient Peoples of Southern Mexico*. Willey Blackwell, Oxford, Massachusetts.

Kabata Shigueru, Julieta Margarita López Juárez, Ariel Taxis Muñoz y Hironori Fukuhara

- 2016 Mapeo y registro de artefactos en 3D utilizando Agisoft PhotoScan y Drone en el Proyecto Arqueológico Tlalancaleca, Puebla. *Boletín del Instituto de Estudios Latinoamericanos de la Universidad de Estudios Extranjeros de Kyoto*. 16:121-140.

Kowalewski, Stephen A., Garry M. Feinman, Laura Finsten, Richard E. Blanton y Linda M. Nicholas

- 1989 *Monte Albán's Hinterland, Part II: Prehispanic settlement patterns in Tlacolula, Etla and Ocotlán, the Valley of Oaxaca, Mexico*. Memoirs No. 23. Museum of Anthropology, University of Michigan, Ann Arbor.

Lillesand, Thomas M., Ralph W Kiefer y Jonathan W. Chipman

- 2008 *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, Inc.

Lind, Michael

- 2015 *Ancient Zapotec Religion: An Ethnohistorical and Archaeological Perspective*. University Press of Colorado.

Medina Carrillo, Fernando

- 2014 *La fotogrametría digital como herramienta de trabajo para la toma de datos y catalogación de las iglesias románicas en la comarca de Las Merindades (Burgos)*. Trabajo fin de grado, Universidad de Alicante.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

- 1972 Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural. Documento electrónico: <https://es.unesco.org/themes/patrimonio-mundial>, accesado el 14 de mayo de 2019.
- 2019 World Heritage List. Documento electrónico: <http://whc.unesco.org/en/list/>, accesado el 14 de mayo de 2019.

Paddock, John

- 1955 Excavations at Yagul, I. *Mesoamerican Notes No. 4*, Departament of Antropology, Mexico City College, Mexico.

Parcak, Sarah H.

- 2009 *Satellite Remote Sensing for Archaeology*. Routledge, Abingdon.

Pérez Álvarez, Juan Antonio

- 2001 *Apuntes de Fotogrametría II*. Tesis ingeniero técnico en topografía, Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida.

Robles García, Nelly

- 2010 *Prehistoric Caves of Yagul and Mitla in the Central Valleys of Oaxaca, Mexico*, editado por Tony Sobel, Layla Ware y Verónica Pérez Rodríguez, pp 1-65. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.

2016 *Mitla: Su desarrollo cultural e importancia regional*. Fondo de Cultural Económica, Ciudad de México.

Robles García, Nelly y Jack Corbett

2001 Problemática social del manejo de recursos arqueológicos. En *Patrimonio histórico y cultural de México: IV Semana cultural de la Dirección de Etnología de Antropología Social*, editado por María Elena Morales Anduaga y Francisco J. Zamora Quintana, pp. 53-64. Instituto Nacional de Antropología e Historia. Colección Científica, México.

Robles García, Nelly y Antonio Martínez Tuñón

2011 Paisajes prehistóricos en Oaxaca. Avances en la investigación de las cuevas Prehistóricas de Yagul y Mitla. En *Monte Albán en la Encrucijada regional y disciplinaria: Memoria de la Quinta Mesa Redonda de Monte Albán*, editado por Nelly Robles García y Ángel Iván Rivera Guzmán, pp. 236-240, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.

Talaverano, Rafael Martín

2014 Documentación gráfica de edificios históricos: Principios, aplicaciones y perspectivas. En *Arqueología de la Arquitectura*. 11:1-26.

Wiseman, James y Farouk El-Baz

2009 Remote Sensing in Archaeology, editado por James Wiseman y Farouk El-Baz. Serie: Interdisciplinary Contributions to Archaeology, pp. 1-9, Springer-Verlag, Nueva York.