

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

Drones, fotogrametría y arqueología en México. Principios y ejemplos***

Resumen: Continuamente surgen tecnologías que apoyan la investigación arqueológica en sus diferentes facetas. De tal modo, en esta oportunidad se presenta un recurso todavía novedoso en nuestro medio, los VANT, mejor conocidos como drones. El uso de estos dispositivos se inscribe en el ámbito de las representaciones espaciales y lo que de ellas puede derivarse: imágenes texturizadas, ortofotos, planos topográficos y modelos digitales de elevación, cuya aplicación, bajo determinadas condiciones, ofrece diversas bondades ligadas a la optimización de recursos y tiempos. Ante la falta de un documento que muestre sus bases, forma de manipularlos y utilidad, se desarrolla este artículo sustentado en una extensa práctica, y se expone a partir de ejemplos de diferente naturaleza. Con ellos se pretende mostrar sus alcances y limitaciones, mismos que pueden generarse por una multiplicidad de factores. Al final se incluye una revisión que a manera de lista presenta el protocolo básico para llevar a cabo las misiones o vuelos.

Palabras clave: dron, fotogrametría, arqueología, VANT.

Abstract: Continuously emerging technologies support different facets of archaeological research. This paper discusses a new resource in our area, UAVs, better known as drones, whose use falls within the scope of spatial representation and what can be derived from it: textured images, orthophotos, topographic maps, and digital elevation models, whose application has benefits linked to the optimization of resources and time. In the absence of a document showing their foundations, how to manipulate them, and their utility, this paper, based on extensive practice, offers different sorts of examples to show the technology's scope and limitations, which can result from a multiplicity of factors. It includes a glossary and a list of the basic protocol to carry out missions or flights.

Key words: drone, photogrammetry, archaeology, UAV

Uno de los aspectos principales que atañen a la arqueología es el espacio, por ello a lo largo de la historia se ha recurrido a diversas formas de representarlo. En este ámbito se encuentran los sitios y su entorno, así como la forma en que se distribuyen los vestigios y sus principios de planeación; de tal suerte, con la intención de figurar el terreno se han generado desde maquetas y cuidadosas hipsografías hasta planos con curvas de nivel,¹ encontrando cada vez medios más sofisticados para apropiarse de las características del medio físico y de las modificaciones culturales existentes.

* Dirección de Estudios Arqueológicos, INAH.

** Dirección de Salvamento Arqueológico, INAH.

*** Este artículo se redactó en 2015; desde entonces, el avance en el uso de estas tecnologías ha sido vertiginoso y lo expuesto podría parecer anacrónico en algunos aspectos.

¹ "Son líneas (imaginarias) trazadas en un mapa topográfico que unen puntos que tienen una misma altitud o cota. Se denominan isohipsas (o curvas hipsométricas) cuando representan el relieve terrestre; isobatas (o curvas batimétricas), cuando representan el relieve submarino". Curvas de nivel (2015).

El texto que se presenta tiene como objetivo básico ofrecer un panorama general de la utilidad que tienen los vehículos aéreos no tripulados (VANT), también conocidos como drones, para algunos aspectos de representación espacial en la arqueología. Se desarrolla desde una perspectiva empírica, que necesariamente debe estar basada en los objetivos de investigación propuestos y condicionada por el entorno físico existente. Su uso no pretende sustituir o reemplazar cualquier otro método de registro, tradicional o novedoso, sólo es una aportación más.

Asimismo se expone un cuadro general de esta labor, cuya trascendencia es significativa en tanto se alcanzan resultados importantes en la tarea de prospeccionar, de manera puntual y en poco tiempo, la superficie donde existen vestigios y, en comparación con otra clase de recursos similares, a mucho menor costo, lo que impacta de manera positiva en los resultados de nuestras labores.

Al no existir una guía sobre el tópic, se enfatiza en la cuestión instrumental del aparato y sus componentes, así como en la operación y protocolo que se debe seguir, considerando la importancia que el factor humano guarda en esta clase de actividades, sin olvidar algunos aspectos documentales con los que se pretende situar históricamente el desarrollo de esta tecnología.

Lo expuesto no constituye un manual ni pretendemos se tome de esa forma; sin embargo, ante la ausencia de una sistematización, lo que se espera es proyectar de manera concreta y adecuada los resultados iniciales de un esfuerzo por utilizar esta herramienta de apoyo a la investigación. Tampoco es una apología sobre marcas o compañías, ya que lo descrito y utilizado se debe a la facilidad que se tiene por aspectos de costo, maniobrabilidad y operación, que en este caso no presenta restricciones normativas, entre otras cosas. También se espera que este trabajo sea punto de partida para estimular críticas, análisis y reflexiones cuya discusión se plasme de manera positiva en nuestro quehacer.

En el texto se dedica un espacio más amplio a los ejemplos que ilustran el cómo se ha ido avanzando, enfatizando que el factor humano incide de manera directa en los resultados obtenidos.

Por último, es necesario recalcar que este recurso es sólo un instrumento para interpretar una

parte de las sociedades que estudiamos, no se debe ver como finalidad el obtener un mapa “vistoso”, o una representación en 3D, sino tomarlo como un medio más para integrar una explicación, junto con la diversidad de aspectos que forman parte de nuestro *corpus* material, técnico, metodológico y teórico.

Los mapas o imágenes resultantes sólo son un documento sincrónico para interpretar lo representado, y con ello los diversos aspectos sociales plasmados en la forma como se utilizó el espacio; se tiene la perspectiva estática del paisaje en el relieve representado y, a la vez, como éste interactúa con el aspecto dinámico que conformarían los vestigios y sus principios de planeación, diseño y construcción, que involucran contenidos culturales de ámbitos diversos como el técnico-constructivo, político, jerárquico y, por supuesto, temporal. El resultado es una representación gráfica plasmada en mapas, además de datos extraídos de innumerables rasgos fisiográficos captados por la serie de fotografías y que se convierten en una nube de puntos que dan pie a la posibilidad de obtener diversas clases de imágenes. Una nube de puntos. “Conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional, que normalmente se definen mediante coordenadas X, Y, Z. Dicha información se considera como partida para extraer posteriormente alzados, secciones, modelos 3E, orto-imágenes, aplicaciones de visualización, animación, renderizado, etc.” (Nube de puntos, 2015).

Visos de historia de los drones

A lo largo de la historia gran parte de los desarrollos científicos y tecnológicos han estado vinculados a mejorar las estrategias bélicas, aunque posteriormente han sido aprovechados en otros ámbitos. Tal es el caso del sistema de satélites que sirven para determinar el punto exacto en la Tierra donde se localiza un individuo o lugar (GPS o *Global Position System*). De igual manera, el empleo de aviones y satélites que realizan tomas fotográficas desde las alturas ha propiciado un bagaje importante en el conocimiento de la topografía del mundo; por este medio se ha generado gran cantidad de información espacial, por

ejemplo: mapas de ciudades, planos topográficos, estudios catastrales, índices de vegetación, establecimiento de límites de países y/o estados.

Hoy en día la utilización de los VANT se ha desarrollado de manera vertiginosa, debido a la liberación de la tecnología de uso exclusivo del ejército —principalmente de Estados Unidos de América— para uso civil. Actualmente tiene lugar un floreciente mercado para estos aparatos, su aplicación puede dividirse en varias ramas entre ellas la recreativa, la comercial, la científica y la académica.

Aunque podría parecer que el empleo de este tipo de vehículos es reciente, se tiene noticias de su uso ya en el “año 1917, cuando gracias al desarrollo del estabilizador giroscópico de Peter Cooper y Elmer A. Sperry se consiguió que un avión no tripulado modelo Curtiss N-9 de la US Navy volara 50 millas controlado remotamente mediante una radio emisora” (Xdrones, 2015). El siguiente intento de utilizar los VANT tuvo lugar durante la Segunda Guerra Mundial, cuando el ejército estadounidense desarrolló el proyecto *Operación Afrodita*, el cual intentó guiar un avión contra el enemigo usando un radio control. Se realizaron varias pruebas, pero el proyecto nunca tuvo éxito.

En la década de 1960 el objetivo en el empleo de los drones cambia: ahora el propósito primordial de estas aeronaves son las misiones de espionaje, tomas fotográficas de noche, lanzamiento de panfletos, detección de lugares donde se emplazaban misiles aire-tierra. Durante la guerra de Vietnam las tropas estadounidenses enviaron más de 3 400 vuelos con drones denominados *Firebees*.

En 1985 la marina de Estados Unidos lanza el programa *UAV Pioneer*: una vez más los drones fueron utilizados para obtener información estratégica de varias zonas y países, entre ellos el Golfo Pérsico, Bosnia, Yugoslavia y Somalia. Como dato curioso, se tiene noticia que durante la Guerra del Golfo un grupo de soldados iraquíes se rindió ante un vehículo aéreo no tripulado (Fahlstrom y Gleason, 2012).

Durante la década de 1990 se retoma la idea de incluir armas en los drones. En 2000, la Agencia Central de Inteligencia (CIA) espía a Afganistán por medio de vehículos aéreos no tripulados. Con un mayor desarrollo tecnológico, en 2002 la mis-

ma agencia realiza ataques contra la población de Afganistán, en esta ocasión utiliza un dron denominado *Predator*. Por primera vez, luego de más de un siglo de experimentos, un vehículo aéreo no tripulado tiene éxito en misiones de bombardeo (Valavanis y Vachtsevanos, 2015).

Nuestra disciplina no está exenta del desarrollo y el empleo de estas aeronaves y su uso se está generalizando en todo el mundo con óptimos resultados. Por tanto, en los últimos años se han realizado varios estudios de los VANT en labores de investigación arqueológica y de protección al patrimonio histórico, los cuales en general refieren una dinámica de comparar resultados obtenidos con esa técnica y mostrar que puede competir con instrumentos empleados anteriormente, como las estaciones totales, escáner laser y cámaras LIDAR (Doneus *et al.*, 2011; Eisenbeiss *et al.*, 2005; Gonizzi Barzanti *et al.*, 2013; Oczipka *et al.*, 2009).

En México este tipo de intervenciones también se ha iniciado (*Reforma*, 2014; Acosta *et al.*, 2015), pero todavía se da muy poco uso a estas importantes herramientas, posiblemente debido a los costos y riesgos que implica el vuelo de los VANT y, por qué no decirlo, a la falta de una guía que muestre el uso y ventajas de tales instrumentos.

En julio de 2014 el INAH, por medio de la Subdirección de Investigación y Conservación de la Dirección de Estudios Arqueológicos (DEA), en colaboración con el Departamento de Antropología de la Universidad de Colorado en Boulder, realizaron el curso “Uso de drones en la investigación, registro y manejo de sitios arqueológicos en México”.² Posterior al curso, varios investigadores del INAH y el investigador de la UCB realizaron un vuelo en la ciudad arqueológica de Cantona, Puebla.

A partir de esa fecha se conforma el equipo que compone el Taller de Drones y Fotogrametría de la DEA y desde entonces se han realizado alrededor de 25 misiones a diversos sitios arqueológicos (las misiones pueden implicar más de un vuelo en un mismo sitio), entre ellos Cuicuilco, Ciudad de

² El curso fue impartido por el doctor Gerardo Gutiérrez Mendoza, de la Universidad de Colorado en Boulder; el Taller de Drones y Fotogrametría se compone de investigadores de la Dirección de Estudios Arqueológicos y la Dirección de Salvamento Arqueológico.

México; Cantona, Puebla; El Otero, Michoacán; Cueva y Presa Purrón, Puebla; Teteles de Ávila Castillo y Mapachtepe, Puebla, y Hacienda Las Pilas, Puebla.

Los resultados del manejo de imágenes digitales mediante un dron y su procesamiento a través de un *software* especializado en fotogrametría (Foster y Halbstein, 2014),³ ha demostrado la utilidad de estas nuevas tecnologías en los trabajos arqueológicos que el INAH realiza en el país y esto ofrece la oportunidad de registrar casi de manera inmediata el estado que guardan los monumentos arqueológicos e históricos. La imagen que se ofrece a continuación se generó de un vuelo de doce minutos, un proceso fotogramétrico de aproximadamente cuatro horas y un dibujo digital elaborado en 30 minutos (fig. 1).⁴

El *Phantom* y su uso

Las ventajas de utilizar el equipo reseñado en este artículo son varias. En comparación con otros, el DJI *Phantom* es de buena calidad y se tiene acceso comercial al mismo y a sus refacciones, además de que su precio es asequible. Una vez que se han practicado algunas sesiones su operación es amable, pues tiene un control preciso y sencillo. En foros de discusión sobre el manejo de estos drones, la mayoría de los usuarios coinciden en que los mejores equipos de bajo costo en el mercado son precisamente los que produce la empresa DJI. Igualmente ofrece medidas de seguridad en caso

de fallos y/o errores humanos, así como eventualidades ambientales. Algo importante es que contiene un GPS o *Global Position System* (un aparato que utiliza las señales que envían los satélites artificiales para calcular e indicarnos la posición en la que nos encontramos) y un controlador de vuelo que permiten tener dominio sobre el vehículo de forma automática o manual.

DJI ha desarrollado varias versiones de su modelo *Phantom*; actualmente comercializa los marcados como 1, 2 y 3. Algunos ya han sido descontinuados, y aun cuando ofrecen esencialmente lo mismo, la diferencia consiste en la autonomía o duración de vuelo y el tipo de cámara con que vienen equipados. Igualmente, los modelos más recientes (*Phantom 3*) ofrecen una ventaja sobre sus antecesores, el uso de un módulo dual (GPS+GLONASS)⁵ que sirve para obtener un mejor posicionamiento satelital.

En función de nuestra experiencia, el modelo que ofrece las mejores condiciones para el trabajo arqueológico es el *Phantom 2 V.2*, como se precisará más adelante con el desarrollo y ejemplos que se presentan (fig. 2).

La normatividad

Algo que debe tenerse en cuenta son los aspectos que regulan el funcionamiento de estos aparatos, que en nuestro país son de muy reciente cuño con la denominada Circular obligatoria de la Dirección General de Aeronáutica Civil (CO AV-23/10 R2), emitida el 8 de abril de 2015 (DGAC, 2015); en el apartado 7.1 se clasifican los VANT en tres categorías, en función de su peso: menos de 2 kg, de 2 a 25 kg y más de 25 kg; también lo hace por su uso, el cual se indica que puede ser recreativo o comercial, sin especificar restricciones para investigaciones científicas o académicas.

De tal modo, los aparatos que pesen menos de dos kilos no requieren ningún tipo de permiso, ya sea para uso recreativo o comercial; sin embargo,

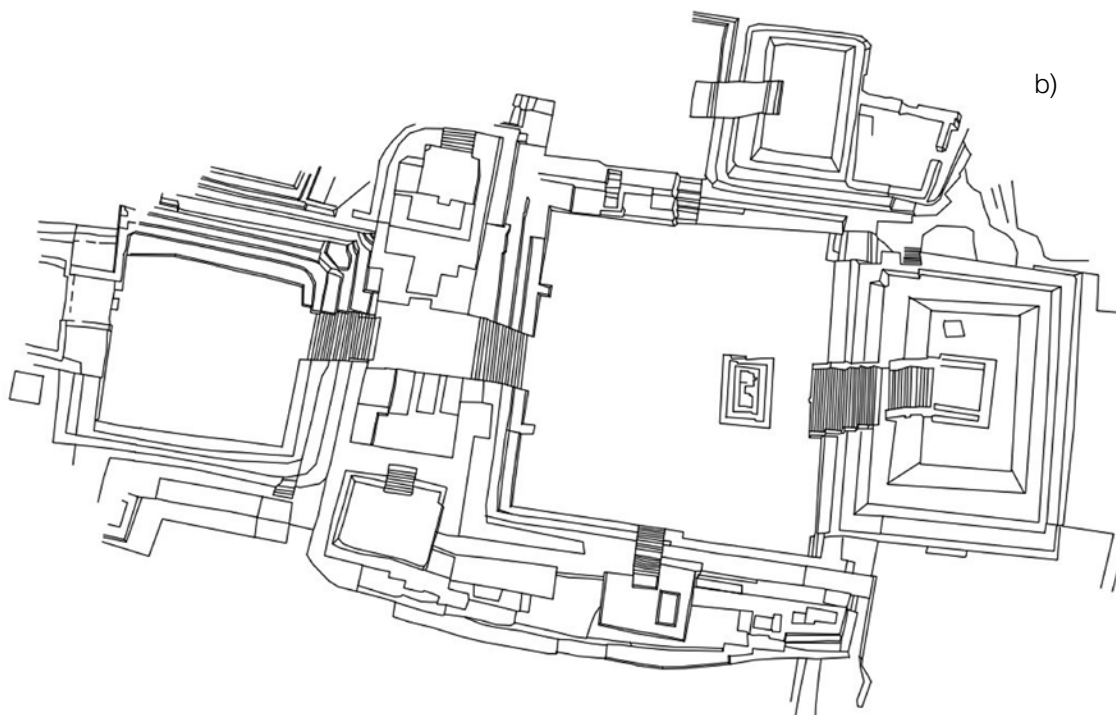
³ Es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado.

⁴ La ortofoto es un "documento fotográfico que se obtiene a partir de las fotografías aéreas en las que se les ha corregido las deformaciones perspectivas de la imagen y se ha restituido la imagen del terreno según una proyección ortogonal vertical." (Ortofoto, 2015). El dron y cámara empleados en este caso son propiedad del doctor Gutiérrez. Piloto y fotografías: doctor Gerardo Gutiérrez Mendoza, de la Universidad de Colorado. Proceso de fotogrametría y dibujo: arqueólogo Cuauhtémoc Domínguez Pérez. Subdirección de Investigación y Conservación, DEA-INAH. Proyecto Especial Cantona, bajo la dirección del maestro Ángel García Cook. DRON: *Phantom* DJI. Cámara: Go Pro HERO 3. Software: PhotoScan 1.1.6. Dibujo: QGIS 2.4.0.

⁵ El GPS o sistema de posicionamiento global se apoya/funciona con doce satélites por hemisferio, 24 en el globo terráqueo, mientras el sistema glonass (*Global/Naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) lo hace con 31, lo cual redundante en un mejor control del aparato.



a)



b)

● Fig. 1 Ortofoto obtenida mediante proceso fotogramétrico y dibujo realizado a partir de la misma. Conjunto Juego de Pelota 7, Cantona, Puebla.



© Fig. 2 *Phantom 2 V. 2.1* y control.

los operadores deben cumplir con los requerimientos y limitaciones de esta categoría, que esencialmente consisten en no superar 122 m de altura (desde el punto de despegue),⁶ no exceder un radio de 457 m entre el dron y el mando, no volar en áreas restringidas como aeropuertos, aeródromos y helipuertos, además de no rebasar una velocidad variable y que depende del peso de cada tipo de aparato (DGAC, 2015). En el caso de los vehículos que superan los dos kilos existe un mayor control para su operación.

El peso del dron que empleamos aumenta en función del equipo adicional que se la haya instalado, como sería la terminal aérea del *DataLink*⁷ (fig. 5), diversos tipos de cámara, *gimbal*,⁸ monturas y demás. Sin embargo hemos visto que incluyendo todos estos accesorios, su peso no al-

⁶ Estas normas presentan ambigüedades que ocasionan confusión y que pueden impactar en el desarrollo de los trabajos.

⁷ "Es el medio de conexión entre dos lugares con el propósito de transmitir y recibir información. Por lo regular se trata de un conjunto de componentes electrónicos, que consisten en un transmisor y un receptor (dos piezas de un equipo terminal de datos) y el circuito de telecomunicación de datos de interconexión. Esto se rige por un protocolo de enlace que permite que los datos digitales puedan ser transferidos desde una fuente de datos a un receptor de datos" (DataLink, 2015).

⁸ *Gimbal*. Estabilizador para evitar que los movimientos propios del vuelo de un Vant afecten las fotografías o videos, pues absorben la vibración de los motores y corrigen automáticamente la inclinación de la cámara para que siempre esté en el mismo ángulo respecto al suelo. Algunos *gimbal* también pueden ser conectados al controlador de vuelo, para ser manipulados por el usuario mediante un control remoto (Gimbal, 2015).

canza los dos kilogramos que la reciente normativa señala como limitante de uso para esta clasificación.

Los componentes físicos del dron

El equipo en su conjunto es un aparato compilador de imágenes en 2D: en un primer momento captura e integra información gráfica y después utiliza procesos fotogramétricos mediante un software específico que permite obtener resultados como nubes de puntos, modelos digitales de terreno, modelos en 3D y ortofotos, los cuales brindan apoyo a diversos análisis e interpretación arqueológica.

Su fuente de energía son baterías de polímero de litio⁹ que ofrecen una autonomía de vuelo de hasta 25 minutos; sin embargo, debemos aclarar que tal duración corresponde a una operación sobre el nivel del mar y sin accesorios, pues al incrementarse la altitud disminuye el tiempo de vuelo debido al cambio de presión y de densidad atmosférica, de modo que su duración oscila entre 11 y 16 minutos ya con el peso de equipo extra (fig. 3). Además, entre otros factores que inciden en la duración o autonomía destacan la velocidad de vuelo, el viento, complejidad del vuelo, número de giros y —como sucede con cualquier otro tipo de vehículo— aspectos que dependen del operador, como el estilo de quien maneja, el cuidado y eficiencia.

En relación con la captura de imágenes, DJI ofrece un modelo llamado *Phantom 2 Vision +*, equipado con una cámara de alta resolución (HD) y un *gimbal* que la estabiliza, la cual ofrece opciones para grabar video y tomar fotografías; asimismo existe una aplicación con la que desde una tableta, e incluso desde un teléfono inteligente, se puede observar en tiempo real el recorrido (FVP) captado por la cámara, además de establecer parámetros de grabación y fotografía con opciones como balance de blancos, exposición, elección de ISO y el intervalo de tiempo entre tomas (fig. 4).

⁹ También conocidas como LiPos, estas baterías de última generación poseen una excelente relación entre capacidad, peso y voltaje, hoy en día son las más usadas en aparatos de radio control (LiPos, 2014).



Fig. 3 Baterías de polímero de litio (LiPo) utilizadas por algunos VANT.



Fig. 4 Modelo *Phantom 2 V.3 Vision +* con cámara integrada.

La particularidad de esta cámara es el tipo de lente con que viene provista, el cual genera imágenes con ángulos muy abiertos y producen deformaciones que son evidentes sobre todo en los extremos; lo anterior provoca menor precisión en los resultados, toda vez que esas imágenes deben pasar por una serie de procesos fotogramétricos que no alcanzan a corregir por completo esa distorsión circular.

En consecuencia, para alcanzar una mejor representación de la superficie debimos recurrir al uso de otra cámara: la Canon PowerShot S100 montada sobre el modelo *Phantom 2*. La utilidad



Fig. 5 Cámara Canon S100 y terminal aérea del módulo *DataLink* montados en el VANT.

que ofrece es variada, por su óptica de gran calidad que brinda nitidez y definición a las tomas, no genera cambios de coloración en las imágenes, tiene enfoque automático y estabilizador, además de control de exposición. El ángulo de visión de la lente es mucho más reducido (24-120 mm; f2-f5.9), lo que permite tomas con poca distorsión, lo cual facilita procesos posteriores y, con ello, la calidad de lo representado. Una ventaja más de este aparato es su poco peso (198 gramos), factor a considerar porque incide de manera directa en la autonomía de la pila y, en consecuencia, de la duración del vuelo. Con esta cámara se pierde tiempo de vuelo pero se gana en calidad de imágenes, lo que es de suma importancia para los trabajos desarrollados (fig. 5).

Otra de las ventajas de esta cámara de uso común es que mediante un *firmware* (CHDK)¹⁰ instalado en la tarjeta de memoria pueden modificarse sus parámetros para programar el intervalómetro,¹¹ además de potenciar otros aspectos.

¹⁰ *Canon Hack Development Kit* (CHDK) es una mejora al *firmware* con que operan algunas cámaras Canon, con esta modificación, las características de la cámara se expande proporcionando muchos más recursos de los incluidos originalmente en cada aparato. El CHDK no es permanente y puede ser retirado con facilidad, (CHDK, 2015).

¹¹ "Dispositivo que acoplado a un motor establece automáticamente un intervalo predeterminado entre exposiciones. Este intervalo puede variar entre un segundo y varios días. Suele emplearse en unión con un dosímetro. (Intervalómetro, 2004).

Para alcanzar una cobertura o traslape¹² adecuado del terreno, se recomienda que el intervalo entre cada obturación se fije en tres segundos, considerando la proporción entre la velocidad del VANT —el cual debe ser de 1.5 m por segundo de desplazamiento horizontal, por cada 20 m de altura—. El porcentaje del traslape o sobreposición longitudinal de las imágenes conforma un elemento indispensable para alcanzar eficiencia en este y otros trabajos fotogramétricos, por lo que se requiere de al menos 60% para facilitar los procesos de orientación y cubrimiento (Falker y Morgan, 2001; INEGI, 2005). Por supuesto, mientras mayor sea el porcentaje de sobreposición (incluso a 90%), se logrará mayor calidad en los mapas elaborados, pero el costo y los tiempos se incrementarían de manera notable.

Otro aspecto relevante que debe tenerse en cuenta es el uso de una tarjeta de memoria con gran capacidad y de alta velocidad, para que permita almacenar las imágenes en poco tiempo y no queden registros incompletos o lagunas a lo largo del recorrido.

Uso y aprovechamiento

Para las labores de investigación arqueológica, la operación del VANT se puede realizar de dos formas, manual y automatizada.

Operación manual

Depende esencialmente de la habilidad y experiencia de quien ejecute el vuelo, así como de condiciones ambientales cercanas a lo óptimo. Lo que más influye para un control eficiente del aparato es el viento y los cambios de presión, además de las tormentas solares (Índice K)¹³ que impactan

¹² Traslape lateral. "Porcentaje de recubrimiento entre dos fotos de líneas adyacentes (25 a 30%)."
Traslape longitudinal. "Es el porcentaje de recubrimiento entre dos fotos sucesivas en la dirección de la línea de vuelo (60 %)." (Fotografías aéreas 2015).

¹³ Índice que refleja las condiciones geomagnéticas (efectos de las partículas solares en el campo magnético de la tierra), sus valores van de 0 a 9. Las estimaciones más bajas significan una ionosfera quieta (0-1), por el contrario a las

directamente sobre las frecuencias que permiten el vínculo entre el control remoto y el aparato. Es necesario señalar que en esta forma de vuelo el dron puede operarse en modo GPS, ATTI¹⁴ y manual, aun cuando el primero ofrece las mejores condiciones para nuestro trabajo.

Operación automatizada

Por medio del uso de un aditamento llamado *DataLink*, que sirve para transmitir la información vía *Bluetooth* a una PC, resulta posible programar los parámetros o el plan de vuelo. Por ejemplo, si se trata de recorrer una línea o hacer la cobertura de un área de diferente forma (circular, rectangular, etc.), así como proyectar la altura, velocidad, distancia, número de puntos y líneas a recorrer; lo anterior se realiza mediante un software denominado *Ground Station* (DJI, 2015), el cual tiene un *plugin*¹⁵ con *Google Earth* que facilita la tarea. Para ello es necesario tener una conexión a internet (se recomienda que sea con banda ancha portable), o bien un teléfono inteligente que permita compartir la señal vía *Wifi*. Lo mismo se puede hacer mediante la aplicación *DJI Vision*, la cual puede obtenerse de forma gratuita para instalarse en dispositivos móviles.

En el caso de operación manual, para obtener mejores resultados se debe seguir un procedimiento detallado, sin olvidar que estos puntos están condicionados a la experiencia del operador e incluyen lo siguiente:

- A. Reconocer el área que se pretende estudiar para delimitarla. Identificar accidentes topográficos y ubicar puntos de control¹⁶ en áreas libres de

tormentas severas (6-9). No se recomienda el vuelo de un VANT con un Índice mayor a 3. (Índice K, 2015).

¹⁴ ATTI: modo de vuelo semi automatico en un VANT, generalmente se emplea en interiores y lugares donde no existe recepción de los satélites que componen el sistema de posicionamiento global (GPS).

¹⁵ "Complemento, aplicación que se relaciona con otra para aportarle una función nueva y generalmente muy específica. Esta aplicación adicional es ejecutada por la aplicación principal e interactúan por medio de la interfaz de programación de aplicaciones" (Plugin 2015).

¹⁶ En la fase de orientación absoluta de las imágenes obtenidas por el VANT se necesitan conocer las coordena-

- obstáculos que impidan la visual de la captura de imágenes del VANT. Estas tomas, de preferencia, deben ser verticales porque ofrecen mejores condiciones para la fotogrametría, así como oblicuas bajas y altas; de esto depende obtener mayor precisión en los resultados, debido al traslape de imágenes.
- B. Seleccionar el área de despegue. Se debe considerar que no haya obstáculos que puedan interferir con el regreso del dron en caso de emergencias, como serían árboles, postes, antenas, cables o edificios. De preferencia, hacerlo desde una parte alta donde se tenga una visual adecuada del sector a volar.
 - C. Colocar el control en modo GPS, siguiendo los detalles de operación en los manuales de cada modelo.
 - D. Calibración de la brújula del dron.
 - E. Posicionamiento del dron con el GPS. Este es un punto de especial cuidado, ya que de no alcanzarlo se corre el riesgo de perder el control del VANT, pues no registraría de manera correcta el punto de despegue al que deberá regresar en caso de emergencia.
 - F. Geoposicionar los puntos de control. Existen varias formas y cada una de ellas ofrece diferente clase de precisión, lo que redundaría en los resultados; lo ideal sería combinar el uso de un GPS de dos bandas con una estación total,¹⁷ para alcanzar un margen de error de 2.5 mm en el ángulo horizontal y 10 mm en el vertical. También se puede utilizar un GPS con antena exterior, lo que proporciona un margen de error de ± 0.50 m, o bien solo GPS con el conocido margen de ± 3 m. Por cuestión tanto de movilidad como de costos nosotros hemos utilizado el GPS con antena exterior y se han conseguido buenos resultados, los cuales pueden constatarse con el montaje de la ortofoto resultante del proceso fotogramétrico en datos georreferenciados.
 - G. Despegue y cobertura con el vuelo. En este punto se deben de considerar varios aspectos relevantes, como la altura del vuelo; la procuración de una velocidad constante; contemplar el tamaño del área a cubrir y la precisión requerida. En este último punto debe estimarse que la autonomía de vuelo puede variar; por ejemplo, en misiones realizadas a una altura de entre 1 600 y 2 550 msnm la batería respalda un uso de 11 a 16 minutos de vuelo. La manera más adecuada de hacerlo es mediante transectos de líneas paralelas, procurando que la separación entre ellas sea homogénea y sin olvidar factores como altura, velocidad constante, abertura del lente, velocidad de disparo (intervalómetro) y características del relieve. El cálculo de los primeros no deja de constituir un aspecto empírico, sujeto a la valoración del operador. Asimismo, como apoyo en la delimitación del área a cubrir, es conveniente el uso de radios manipulados por quienes estén situados en sus términos y le puedan comunicar al operador del VANT que se ha llegado al límite previsto.
 - H. Establecer los criterios para orientar las líneas de vuelo o transectos. Éstas se deben adecuar a la forma, tamaño y complejidad del área que se pretende cubrir, lo mejor sería seguir el mismo principio con el que se delimitan los sitios, a partir de la identificación de rasgos del relieve que permitan aislar espacialmente el asentamiento en su totalidad o sus sectores. Con este método se optimiza la cobertura y el número de líneas, lo cual permite reducir variaciones y cantidad de tomas.
 - I. También es necesario considerar la mejor hora para volar, aspecto que depende de varios factores: los más relevantes serían el viento, el ángulo de incidencia de la luz y el Índice K, cuyo impacto puede ser a cualquier hora. De preferencia se debe evitar la tarde avanzada, pues la presencia de sombras largas generaría la interpretación de un volumen falso durante los posteriores procesos fotogramétricos; lo recomendable es hacerlo con tiempo nublado. Lo anterior en contraste con el procedimiento de la fotointerpretación, que sí requiere de un nivel de proyección de sombra para apoyar la definición de rasgos del terreno.

das terrestres (X, Y y Z) de una serie de puntos previamente establecidos y que sirven para ajustar la escala del modelo estereoscópico y realizar su nivelación (Punto de control, 2015).

¹⁷ Aparato electro-óptico utilizado en topografía, cuyo funcionamiento se apoya en la tecnología electrónica. Consiste en la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador a un teodolito electrónico (Estación total, 2015).

Para el modo automatizado se sigue el mismo procedimiento marcado en los incisos A y hasta el F, lo que varía es la forma de programar el vuelo. Ésta contrasta con el modo manual al utilizar el software *Ground Station*, el cual permite delimitar el espacio de interés, tanto su perímetro como el área del polígono requerido, con base en líneas o transectos. Estos últimos permiten y facilitan realizar barridos de la superficie a prospectar con datos establecidos de manera previa: altura, velocidad, donde inicia y termina su recorrido, giros al cambiar de rumbo, tiempo total de vuelo, distancia a recorrer, además de mostrar su desplazamiento en tiempo real en la pantalla de la computadora.

En su aplicación primero se realiza todo el proceso de encendido del dron hasta su posicionamiento, después se enciende la PC con el *DataLink* instalado y se le da conectar. En ese momento aparece una representación —en forma de V invertida y de color rojo— del punto donde está posicionado el dron. Después de esto, en la barra de herramientas que tiene la opción de los idiomas chino e inglés, se despliega la pestaña *Tool Box* y se selecciona *Route template* (patrón de ruta), se busca la opción de *Add área* (añadir área) y aparece un cuadro en tono verde semitransparente, en el cual se establece el área a estudiar. A continuación, en la opción *Scan* se modifican los parámetros de altura y número de líneas a recorrer.¹⁸ Luego se selecciona la opción *Import to edit list* y se despliegan dos ventanas, la primera contiene valores de tiempo de vuelo, ruta y su forma de terminar; dónde se quiere que inicie y finalice la misión; referencias de velocidad de ascenso y de desplazamiento y la forma de giro a realizar entre cada *waypoint* al cambiar de un transecto a otro. La segunda ventana ofrece un resumen del tiempo estimado de vuelo y la distancia total a recorrer, aspectos que son muy importantes para planear una misión óptima, por la autonomía o duración de la pila, considerando además el tiempo que tarde en regresar el dron al punto donde despegó.

¹⁸ Las controladoras de vuelo de modelos *Phantom* únicamente soportan 16 *waypoints*, que equivalen a ocho líneas o transectos.

Una vez revisada la información, se le da cargar (*Upload*) y vía *Bluetooth* ingresa a la controladora de vuelo¹⁹ del dron; con la opción de *Go*, el VANT se enciende, despegar y realiza el recorrido programado.

Para obtener mejores resultados y evitar contratiempos, es recomendable que antes de hacer el proceso descrito con el *Ground Station* se realice una visita para valorar las condiciones existentes en el terreno a inspeccionar e identificar cualquier tipo de objetos que obstaculicen el desplazamiento del dron: cambios bruscos de relieve, zonas de árboles altos, instalaciones como tendidos eléctricos, antenas y postes —todos ellos son datos fundamentales para planificar el vuelo.

El proceso fotogramétrico

Para ilustrar el procedimiento de cómo obtener diversos productos cartográficos, necesarios para el registro de sitios arqueológicos, se seleccionó —para ofrecer un ejemplo general— el asentamiento El Crucero, registrado por el Proyecto Arqueológico Región de Tlacotepec-Xochitlán, Puebla, y que generó 110 imágenes de 12 megapíxeles cada una. En el sitio se colocaron cuatro puntos de control sobre el terreno y sus coordenadas fueron obtenidas con un GPS Garmin modelo 62s provisto de una antena externa Garmin modelo GA38 para obtener una mayor precisión en las lecturas (figs. 6 y 7).

La misión fue planificada con ayuda del software de DJI *Ground Station 4.0.11*. Se realizó un vuelo en el modo *Scan*, con ocho líneas a recorrer, a una altura de 45 m y una velocidad de 4 m por segundo. La distancia total que recorrió el dron fue de 966.94 m, en un tiempo de 10:07 minutos, el área cubierta fue de aproximadamente 2.4 ha.

El proceso fotogramétrico fue realizado con el software de la empresa rusa Agisoft, denominado *PhotoScan v.1.1.6* (Agisoft, 2014) en una PC marca HP modelo p67851a con un procesador Intel Core i7 de ocho núcleos a 2.93 GHz, sistema ope-

¹⁹ Este componente es el cerebro de los VANT, supervisa y controla todo lo que sucede en el multirrotor, y es a donde prácticamente todos los componentes van conectados (Controladora de vuelo, 2014).



● Fig. 6 GPS Garmin modelo 62s.



● Fig. 7 Antena externa Garmin GA38.

rativo Windows 7 de 64 bits, 8 GB de memoria RAM y una tarjeta de video Cedar (2 Cores @ 650 MHz, 1024 MB).

Los productos obtenidos por medio de la fotogrametría fueron procesados en dos softwares utilizados para sistemas de información geográfica, nos referimos a *QGIS v. 2.8.1* y *ArcGis v. 10.1*; con ellos se procesaron los MDT²⁰ y las

²⁰ Modelo digital de terreno. "Determinación de la superficie de un territorio mediante un conjunto denso de puntos topográficos en el que sus coordenadas son registradas digitalmente para poder ser procesadas y obtener así las

ortofotos, además de realizar la edición de curvas de nivel y de los planos que se muestran.

A continuación se presentan varias imágenes que ejemplifican las partes más importantes del proceso fotogramétrico, y se hace una breve exposición sobre algunos aspectos técnicos. El sitio El Crucero ofrece la posibilidad de mostrar de manera clara y sencilla los pasos a seguir para procesar las imágenes obtenidas con el vant, por lo que se presenta como un ejemplo básico.

Sitio El Crucero

El asentamiento se localiza en el municipio de Molcaxac, estado de Puebla, a una altura de 1 809 msnm. El terreno ha sido modificado por actividades agrícolas. Se compone de un conjunto formado por un montículo de 4 m de alto y una plaza en su costado noroeste delimitada por plataformas en todo su perímetro, excepto en la parte suroeste, donde posiblemente fue arrasada para hacer más grande el terreno de cultivo.

El primer paso del proceso fotogramétrico orienta las fotografías y detecta los puntos en común que puedan tener una o más imágenes (a diferencia del proceso de la fotografía aérea, que para armar los mosaicos hace uso del traslape de imágenes); de esta manera se genera una primera nube de puntos que son la base de todo el procedimiento, en este ejemplo el primer conglomerado fue de 16 931 puntos.²¹ También se puede apreciar la posición de cada una de las tomas realizadas por el VANT; es decir, las ocho líneas planeadas de manera previa en el *Ground Station* y transmitidas mediante la terminal terrestre del *Datalink* al dron (fig. 8). Las posiciones de las cámaras se representan por rectángulos de color gris (fig. 9).

En seguida coloca los puntos de control identificados en cada una de las imágenes donde aparecen las marcas ubicadas sobre el terreno; de esta manera se establece el sistema de coordenadas

curvas de nivel, perfiles topográficos, bloques diagrama, etc." (MDT, 2015).

²¹ Cada uno de estos puntos tiene información tridimensional, X, Y y Z, por lo que al referirlos a un sistema de coordenadas determinado quedan ubicados de manera precisa en ese marco de datos.



Fig. 8 Terminal terrestre del módulo *DataLink*.

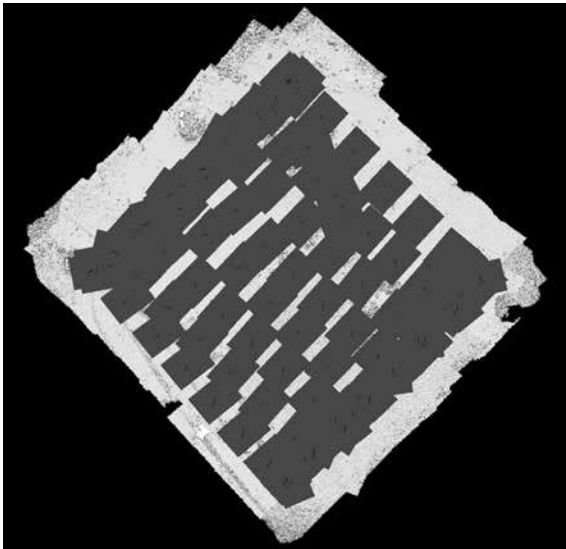


Fig. 9 Ubicación de imágenes, escaneo y nube de puntos base.

que se va emplear en el proceso. En este caso se colocaron únicamente cuatro puntos de control, representados por puntos con banderines y un número (fig. 10). En esa misma figura se puede observar la nube de puntos densa, la cual consta de 46 698 925 puntos.

Para eliminar del modelo fotogramétrico algunos elementos como vegetación, edificios, vehículos, entre otros, se utiliza una herramienta para hacer una clasificación de las diferentes clases de puntos presentes, en este caso nos interesaba retirar la vegetación mayor, debido a que al generarse el modelo digital de terreno estos elementos

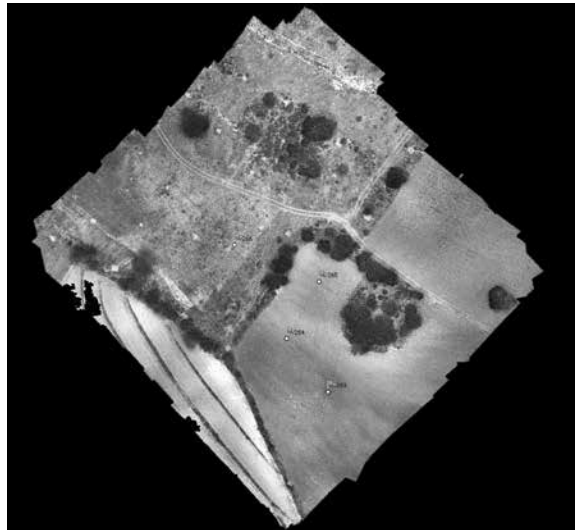


Fig. 10 Nube de puntos densa, con puntos de control.

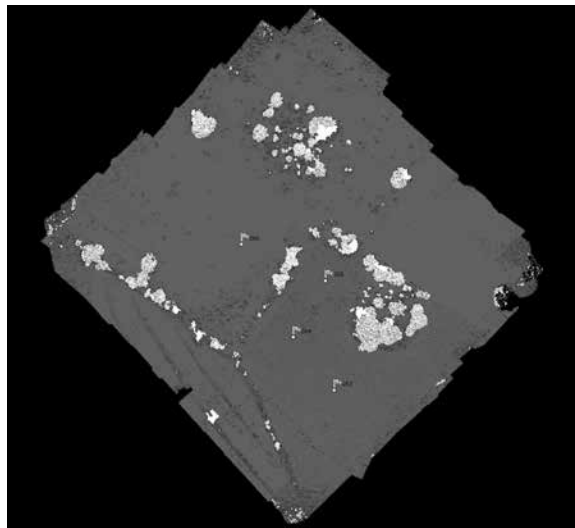


Fig. 11 Clasificación de la nube de puntos. En tonos claros se representa la vegetación, en tonos grises el terreno.

aportan datos altimétricos que afectan la construcción de sombreados y principalmente de las curvas de nivel. Es oportuno recordar que lo que interesa en un trabajo arqueológico es la forma del terreno, no de la vegetación (fig. 11).

Para hacer más elocuente el resultado de la clasificación de puntos en la nube densa, mostramos un sombreado monocromático donde se aprecian los huecos dejados por la sustracción de los puntos

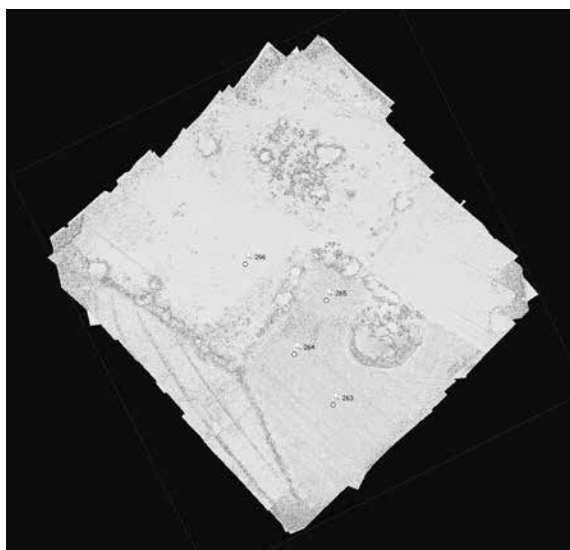


Fig. 12 Sombreado monocromático, obsérvese las zonas sin textura, áreas excluidas con la clasificación de la nube de puntos densa.

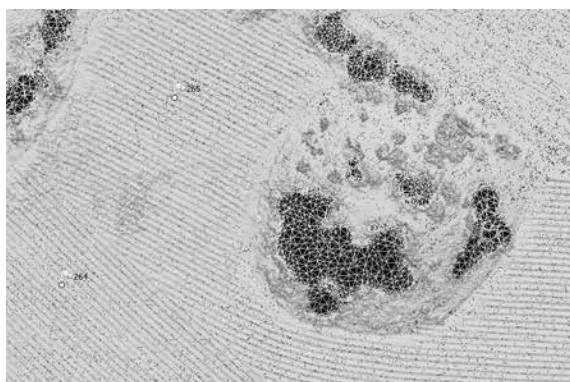


Fig. 13 Detalle de la red construida a partir de la clasificación de la nube de puntos densa, área donde fue eliminada la vegetación.

correspondientes a la vegetación. Estos sombreados son producto de la creación de una malla a partir de la nube de puntos clasificada, donde solamente se tomaron en cuenta los puntos de color café para crear la red del modelo. En este caso, la red tuvo 4 956 599 caras y 2 482 427 vértices (fig. 12).

En la figura 13 se puede apreciar el detalle de la red construida a partir de la nube de puntos densa clasificada, las zonas con un entramado más abierto corresponden a las partes excluidas por la

clasificación; el software realiza cálculos por medio de complejos algoritmos que subsanan las áreas donde no existe información; en otras palabras, se hace una reconstrucción del terreno con la información topográfica adyacente a los sectores con exclusión de puntos.

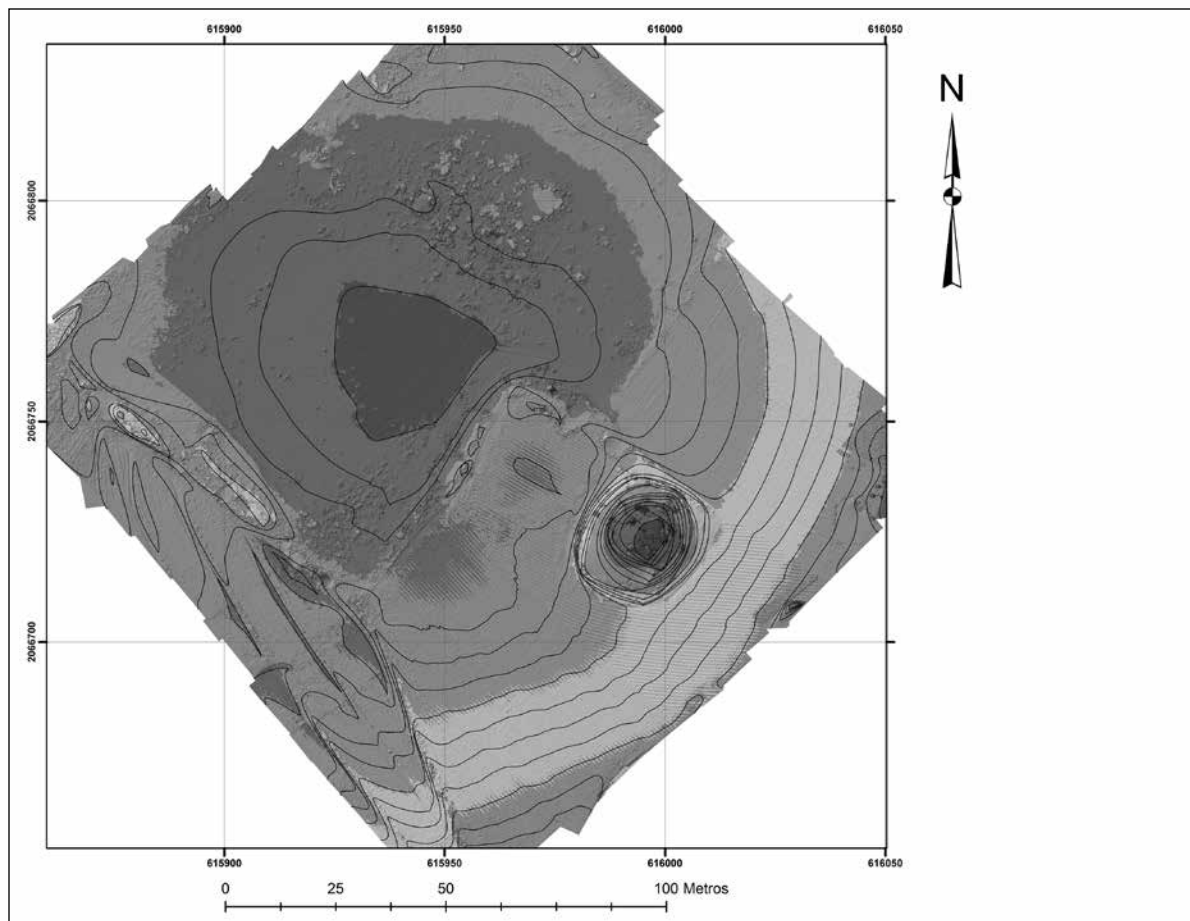
Una vez realizado todo el trabajo fotogramétrico, el software *PhotoScan* ofrece la posibilidad de exportar diversos tipos de archivos, entre ellos modelos, puntos, ortofotos y modelos digitales de elevación (MDE, 2015).²² Hasta este momento únicamente se han trabajado dos tipos de archivos, los MDE y las ortofotos, ambos en terminación TIF. Estos archivos *raster*²³ contienen datos espaciales para poder trabajarlos en un *software* especializado en sistemas de información geográfica, hecho que permite situarlos en un espacio determinado, en esta oportunidad esos registros han sido georreferenciados mediante el sistema de coordenadas UTM y el *datum* WGS84.

De manera general se parte de los archivos MDE y en un primer momento se construyen las pirámides que permiten visualizar el archivo en *Arc-Map*; a continuación el programa pide crear las estadísticas del archivo y entonces se clasifica por una equidistancia, por ejemplo 10 m, para luego asignarle una simbología que corresponderá a las alturas del modelo.

Una vez realizado lo anterior se crea un sombreado que se coloca en la capa más baja del proyecto, este archivo sirve para dar realce a las capas que se le sobreponen. A partir de los valores contenidos en el MDE se generan archivos de curvas de nivel, mismos que pueden ir al intervalo regular que mejor se adapte a las necesidades del modelo; en el caso del sitio El Crucero se empleó un MDE clasificado en intervalos de un metro, con curvas de nivel a cada 0.25 m y un sombreado (fig. 14).

²² "Representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y *software* especializados" (MDE, 2015)..

²³ *Raster*: Imagen de píxeles, que suele definirse por su altura y anchura (en píxeles) y por su profundidad de color (en bits por píxel).



● Fig. 14 MDE, con sombreado y curvas de nivel a 0.25 m.

Una vez creadas las capas necesarias, pueden alternarse para buscar la mejor apariencia e interpretar la mayor cantidad de datos visibles; es importante señalar que algunos rasgos del terreno sólo son perceptibles en los sombreados, por ello es recomendable generar al menos estos tres tipos de archivos a partir del MDE (fig. 15).

Se debe señalar que algunos archivos de curvas de nivel pueden procesarse para suavizar las líneas, ya que existe la posibilidad de que aparezca mucho “ruido” (fig. 16); además deben editarse los resultados del suavizado de líneas para quitar los rastros de la clasificación de la nube de puntos densa, los resultados de esta edición harán más claros y precisos los archivos de curvas de nivel (fig. 17).

En la figura 18 se muestra la sobreposición de las curvas de nivel cada 0.25 metros en la ortofoto.

Aunque en este caso no se hizo, se debe mencionar que estos archivos pueden servir para hacer propuestas sobre la planimetría de determinado asentamiento, así como para realizar dibujos de gran precisión, ya que la resolución de estos archivos es de 2.5 cm por pixel.²⁴

En el presente caso el procedimiento y tiempo empleados para generar los resultados que se muestran fueron los siguientes: *a)* colocación de puntos de control, planeación y realización del vuelo, dos horas; *b)* proceso fotogramétrico y obtención del MDE y ortofoto, 20 horas y *c)* generación de sombreados, curvas de nivel, edición y elaboración de planos, diez horas. El tiempo total

²⁴ Pixel. Del inglés *picture element* (elemento gráfico). Las fotografías digitales están compuestas de miles o millones de ellos; son los elementos constitutivos de las imágenes digitales (Pixel, 2015).

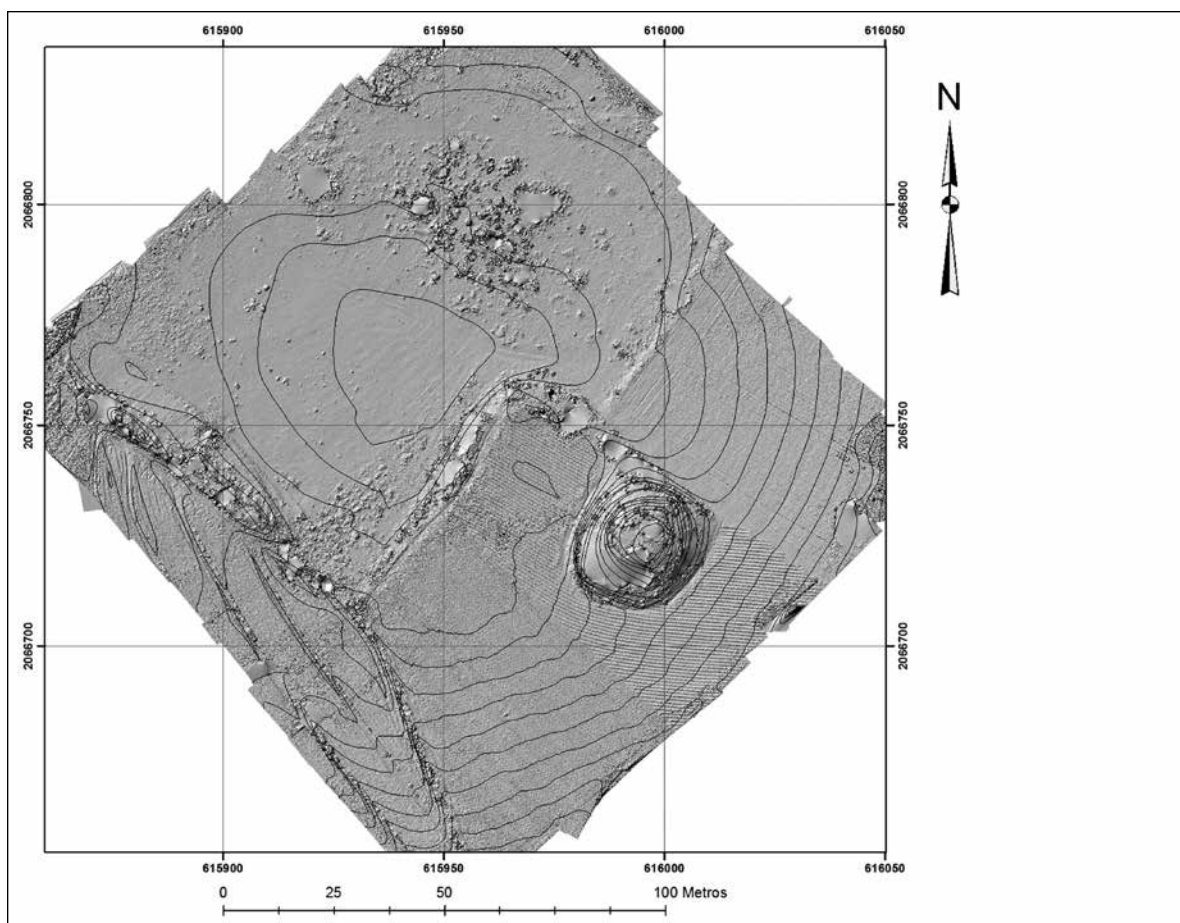


Fig. 15 Sombreado con curvas de nivel a cada 0.25 m.

invertido fue de 32 horas de trabajo, pero se debe resaltar que la menor parte del tiempo (dos horas) fue en el sitio arqueológico: esto indica que los recursos empleados en campo pueden ser optimizados con este medio.

Por último mostramos una comparación entre una imagen satelital de *Google Earth* y un detalle de la producida con un VANT y procesada por fotogrametría, la diferencia es notoria (figs. 19 y 20).

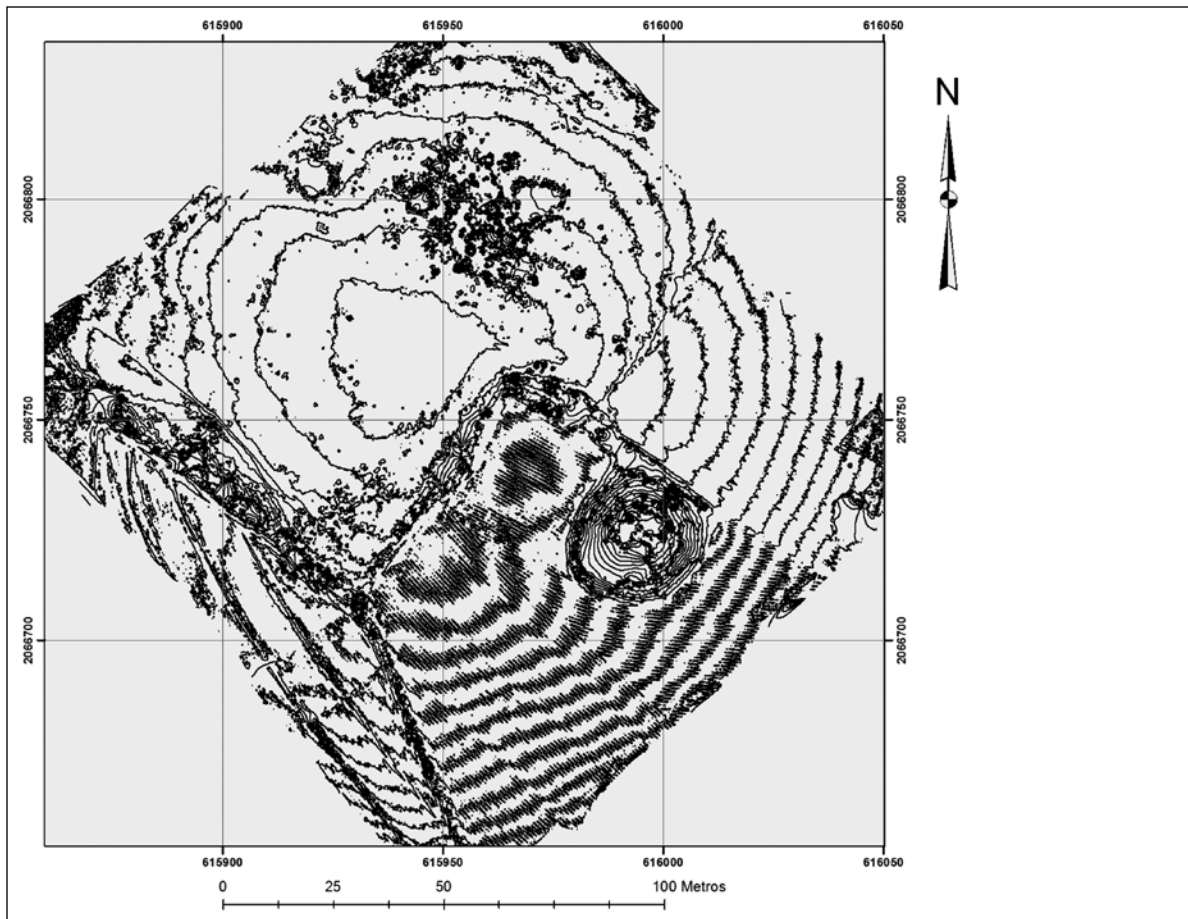
Los ejemplos trabajados

Una vez señalado lo anterior, se presentan una serie de ejemplos donde se registran parámetros y referencias particulares de cada misión, así como los diversos resultados que ilustran el proceso de

ensayo y error que hemos enfrentado como algo necesario, pues a la fecha no existe un manual que guíe el empleo de los VANT para labores arqueológicas.

Es oportuno mencionar que cada uno de estos levantamientos aéreos constituyen un evento particular sujeto a una serie de factores que inciden en la forma como se abordan, en tanto los resultados óptimos dependen de la habilidad y experiencia adquirida —como el lector podrá observar en la documentación gráfica que acompaña este apartado.

La forma en que se desarrolló su aplicación puede presentar dificultades posteriores, manifestadas en los procesos de fotogrametría, como no admitir la georreferenciación; por lo demás, la falta de control en la altura y velocidad de despla-



© Fig. 16 Archivo de curvas de nivel a 0.25 m, sin suavizar.

zamiento genera muchas imágenes repetidas de una misma zona y/o muy pocas de otra, lo cual impacta en el número de fotos tomadas, provocando una cobertura irregular y que la identificación de puntos no sea adecuada, aparte de alargar la duración del proceso al trabajarse con gran número de tomas.

Cuicuilco B, Distrito Federal

VANT: DJI *Phantom 2* v.2.
 Cámara: Canon PowerShot S100.
 Resolución: 4000x3000 pixeles.
 Distancia focal: 5.2 mm.
 Método: Manual.
 Altura del vuelo: 31.6 m (promedio).

Número de puntos terrestres de control: 10.
 Número de imágenes: 155.
 Nube de puntos básica: 24 469.
 Nube de puntos densa: 13 157 302.
 Superficie mapeada: 1.64 ha.
 Error: 1.95 m.

En este ejemplo se puede apreciar la posición heterogénea de las tomas realizadas; este vuelo fue el primero con la cámara montada y el apoyo de puntos de control terrestre. Por la falta de uniformidad de las fotos se observa con claridad la falta de pericia en el manejo del VANT, que la altura no es constante y el vuelo no sigue una línea recta; tampoco se obtiene una velocidad continua durante el vuelo, lo cual ocasiona un traslape de imágenes irregular (figs. 21 y 22). A pesar de ello

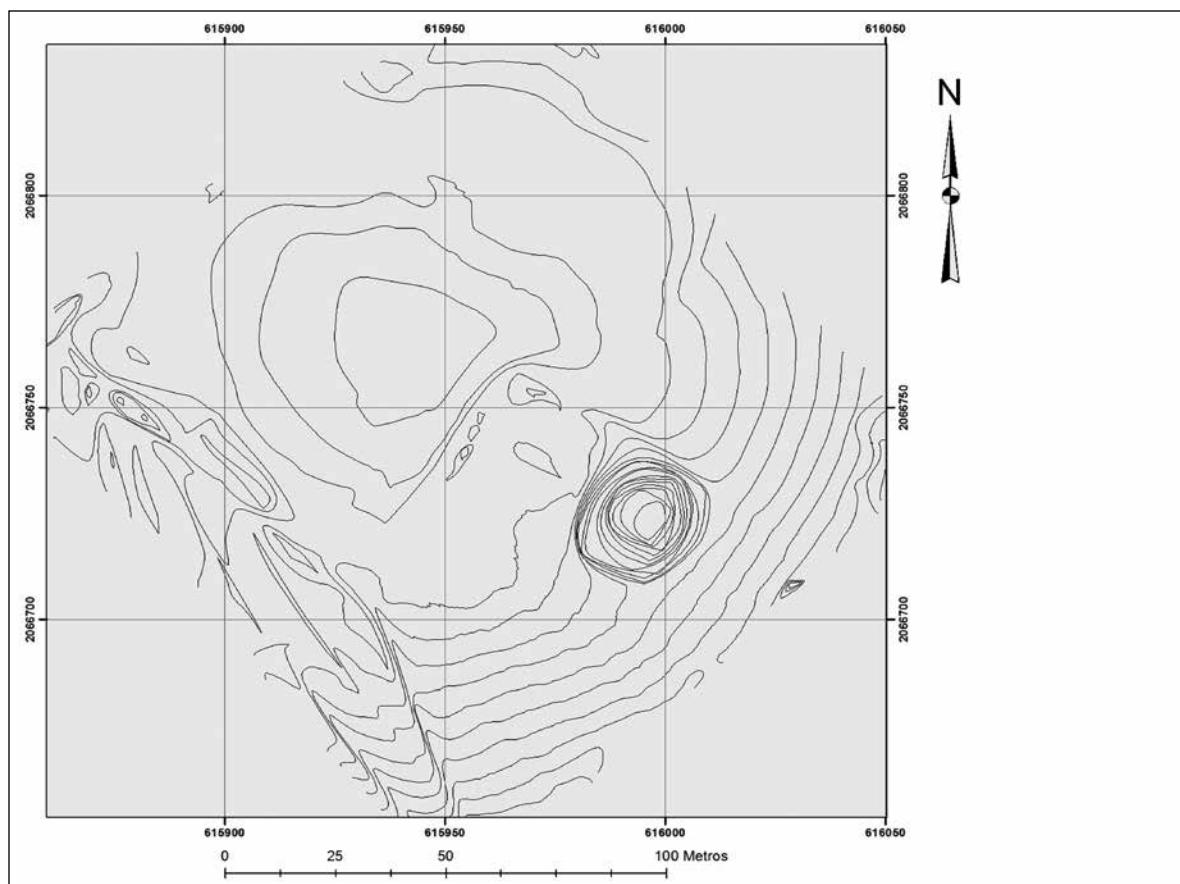


Fig. 17 Archivo de curvas de nivel a 0.25 m, suavizado y editado (limpio).

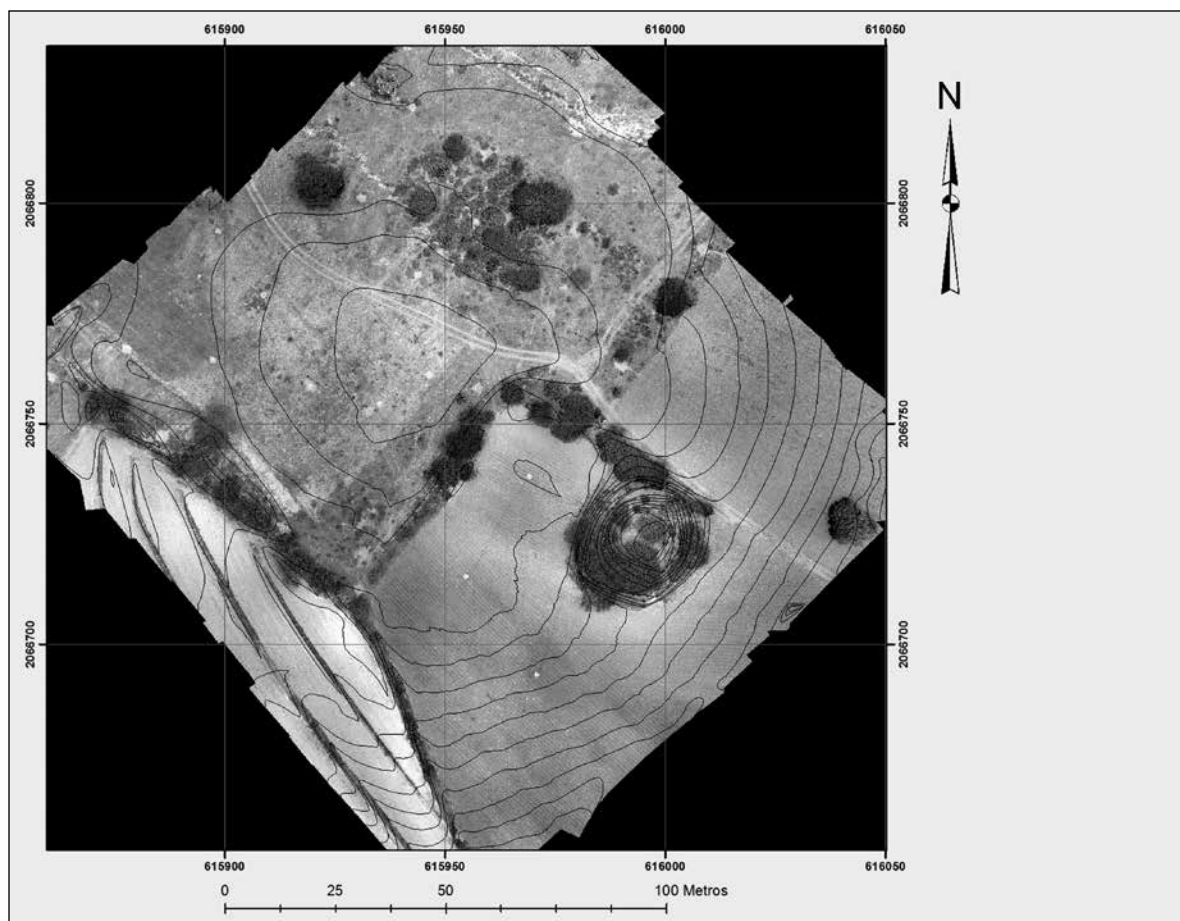
fue posible obtener imágenes que dan cuenta precisa de los vestigios, como se puede apreciar en el sombreado monocromático de la figura 23.

Sitio Carabino, Guanajuato

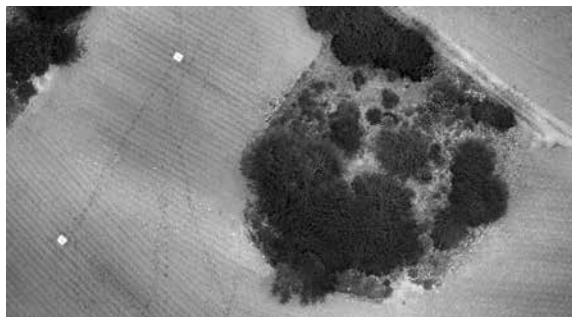
VANT: DJI *Phantom 2* v.2.
 Cámara: Canon PowerShot S100.
 Resolución: 4000x3000 pixeles.
 Distancia focal: 5.2 mm.
 Método: Manual.
 Altura del vuelo: 37.68 m (promedio).
 Número de puntos terrestres de control: 7.
 Número de imágenes: 498.
 Nube de puntos básica: 38 331.
 Nube de puntos densa: 36 636 796.
 Superficie mapeada: 6.69 ha.
 Error: 0.28 m.

A diferencia del sitio anterior, donde nos iniciamos en los vuelos con drones y donde habíamos practicado con el vehículo cuando menos en tres ocasiones previas, el asentamiento de Carabino era totalmente desconocido, además de ser una de nuestras primeras experiencias en misiones de mapeo en sitios arqueológicos. Esta situación generó cierta incertidumbre en la estrategia a utilizar en el levantamiento: en primer lugar debimos realizar un pequeño recorrido para determinar el área a cubrir con el VANT; una vez definida la superficie, se procedió a colocar los puntos de control y su posicionamiento, para entonces realizar los vuelos en modo manual.

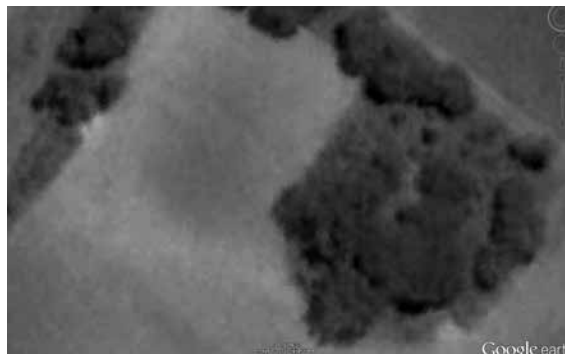
La misión fue llevada a cabo con tres vuelos, ninguno de ellos sistemático, ni homogéneo, debido en parte a la presencia de mucho viento y llovizna ligera durante el tiempo de vuelo. De ellos obtuvimos cerca de 500 imágenes desordenadas,



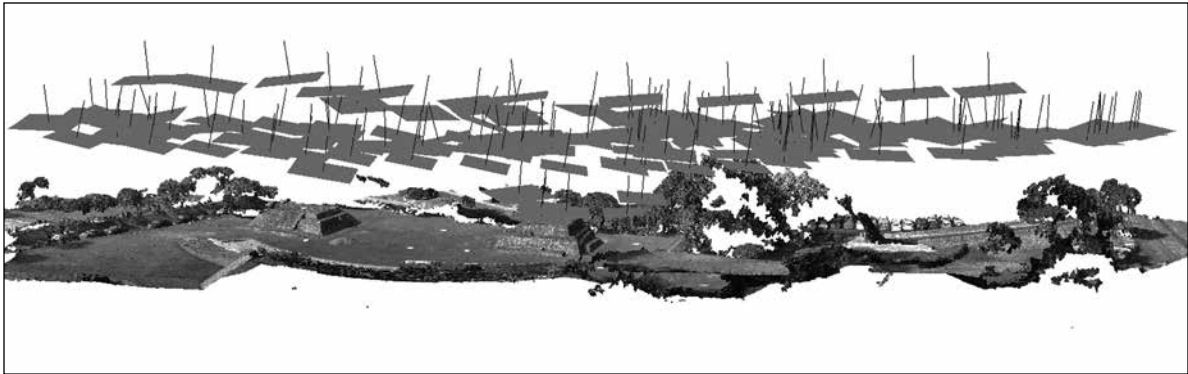
● Fig. 18 Ortofoto con curvas de nivel a cada 0.25 m.



● Fig. 19 Detalle ortofoto generado a partir de las imágenes obtenidas por un VANT y procesadas con *PhotoScan*, los puntos de control que se observan en el terreno miden un metro por lado.



● Fig. 20 Imagen de *Google Earth* a la mayor resolución posible.



● Fig. 21 Cuicuilco B. Vista oblicua alta de la nube de puntos densa, en la parte superior está representada la posición de las tomas realizadas por la cámara montada en el VANT.



● Fig. 22 Cuicuilco B. Planta del recorrido del VANT (nótese el desorden en las líneas de vuelo).

por lo cual se decidió realizar el proceso fotogramétrico con todas las fotografías y ver si de esta manera se podría subsanar la falta de sistematización en la cobertura. Pese a disponer de bastantes imágenes, en esta muestra el modelo presenta áreas con poco traslape y en los casos extremos se carece de cobertura fotográfica.

En las figuras 24, 25 y 26 se puede apreciar la secuencia de los tres vuelos que componen la misión, confirmando que existe una falta de sistematización en las rutas seguidas: la altura es variable,

los espacios entre fotografías también son bastante irregulares, la velocidad del dron no fue constante, hay varias zonas con muchas tomas fotográficas y otras no tienen cobertura.

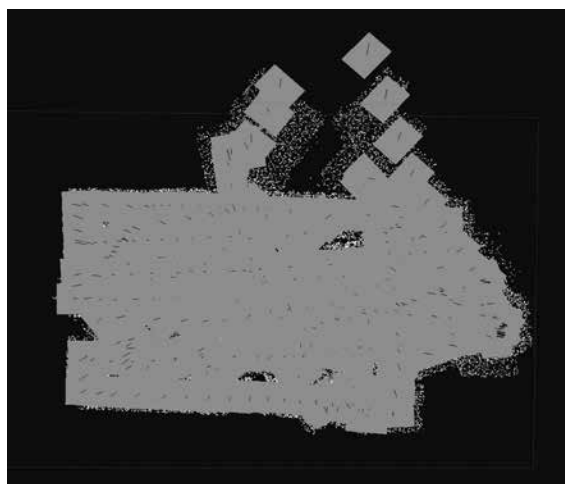
No obstante todos los inconvenientes referidos, se pudo obtener un modelo digital de terreno y una ortofoto, ambas georreferenciadas y de buena calidad, aun cuando se aprecia la falta de cobertura en un hueco situado en el centro-este de la ortofoto (figs. 27 y 28).



● Fig. 23 Cuiculco B. Sombreado monocromático.



● Fig. 24 Los cuadros más oscuros representan la posición de las cámaras del primer vuelo; los de tono más claro son del segundo vuelo.

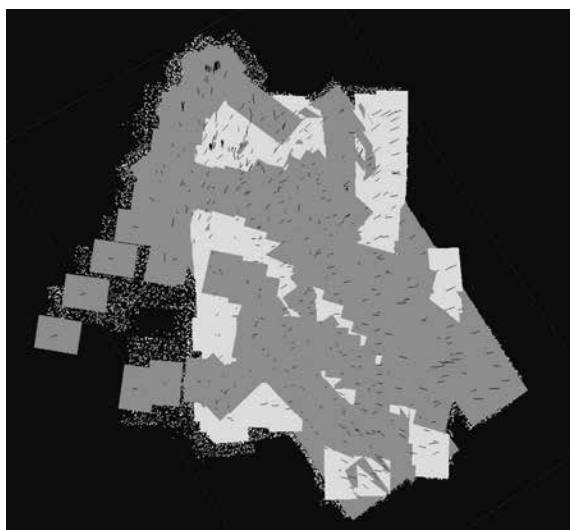


● Fig. 25 Posiciones de las cámaras de los vuelos 1 y 2.

El Zapote, Guanajuato

VANT: DJI *Phantom 2* v.2.
 Cámara: Canon PowerShot S100.
 Resolución: 4000x3000 píxeles.
 Distancia focal: 5.2 mm.
 Método: Automático.

Altura del vuelo: 30 m.
 Número de puntos terrestres de control: s/p.
 Número de imágenes: 183.
 Nube de puntos básica: 35 409.
 Nube de puntos densa: 28 852 157.
 Superficie mapeada: 3.5 ha.
 Error: sin datos.



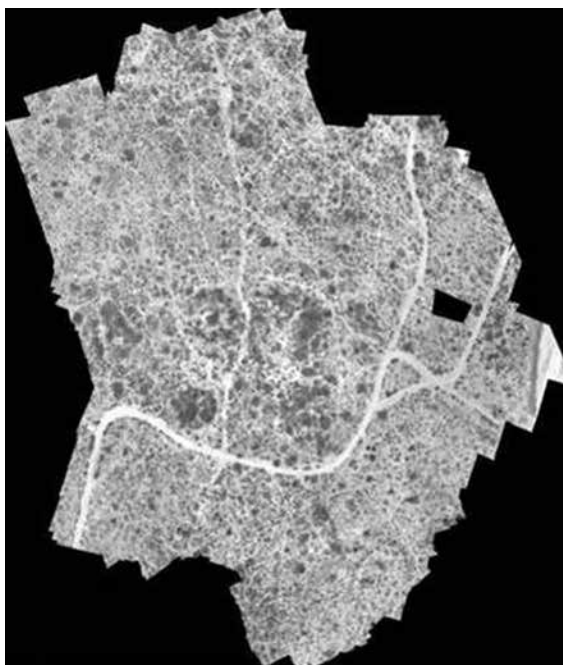
● Fig. 26 Los cuadros en tono claro representan las cámaras correspondientes al tercer vuelo, obsérvese que se ubican a menor altura que los vuelos anteriores.

Primer vuelo de manera automática utilizando un *DataLink*, para transmitir el plan de vuelo al VANT se empleó el software *Ground Station*. En la figura 29 se aprecian las líneas de vuelo perfectamente establecidas, producto de una velocidad constante, lo que redundó en un traslape frontal adecuado; caso contrario al traslape lateral, que por falta de altura tuvo una cobertura insuficiente y ello generó falta de información en todas las áreas ubicadas entre las líneas de vuelo; esta distorsión en los modelos es evidente, ya que se formaron unas líneas en las zonas donde no existió la cobertura lateral adecuada. Para corregir este problema, se debe hacer un vuelo a mayor altura, al menos 15-20 m, de esta manera la cobertura hubiera sido completa.

El error anterior no permitió asignarle un sistema de coordenadas al modelo, por lo que no se obtuvo un modelo digital de terreno, ni la ortofoto correspondiente, en este caso sólo se llega a obtener una imagen aérea texturizada (fig. 30).

Sitio Horno Hornitos, Puebla

VANT: DJI *Phantom 2 V.3 Vision +*.
Cámara: DJI FC200.



● Fig. 27 Ortofoto del sitio Carabino, en la parte izquierda se aprecia una zona en color negro, que muestra un área que no alcanzó a tener cobertura.

Resolución: 4384x2466 pixeles.

Distancia focal: 5 mm.

Método: Manual.

Altura del vuelo: 12 m.

Número de puntos terrestres de control: 4.

Número de imágenes: 122.

Nube de puntos básica: 10 211.

Nube de puntos densa: 3 671 970.

Superficie mapeada: 98.5 m².

Error: sin datos.

A diferencia de los ejemplos anteriores, donde las tomas de las imágenes se realizaron de manera cenital, en ese caso se emplearon tres ángulos, horizontal, vertical y oblicuo, con el modelo señalado que trae la cámara integrada; tal método ya se ha utilizado con éxito en otros sitios (Peinado *et al.*, 2014: 51-58). Lo anterior debido a las características del elemento a levantar, un horno de cal elaborado en el interior de una barranca; ahí se excavó parte del tiro, boca y varios pasillos, para lo cual se realizó un vuelo en líneas horizontales, con una separación aproximada de 2 m

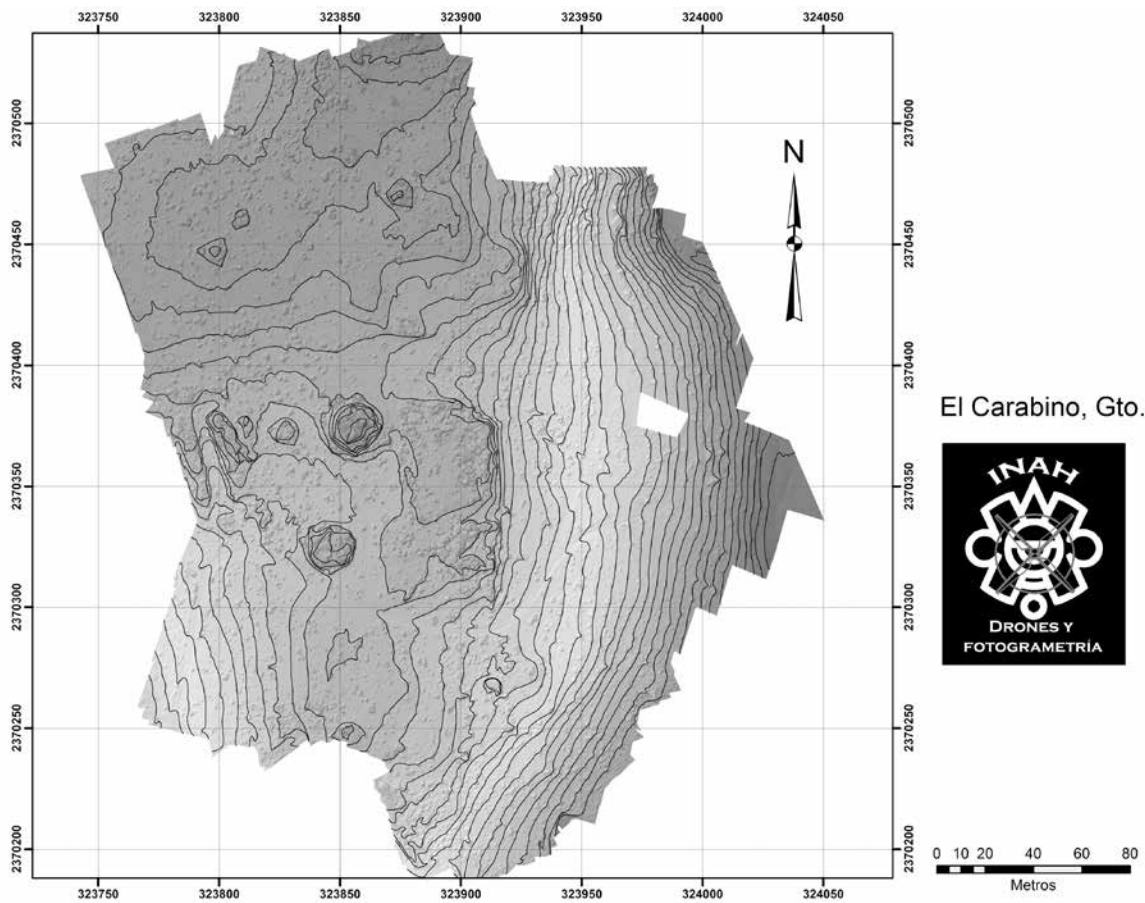


Fig. 28 Modelo digital de terreno (MDT) con curvas de nivel, sitio El Carabino.

entre cada una de ellas. Se realizó otro vuelo para registrar la parte superior del elemento y su área adyacente; en esta oportunidad de realizaron tomas verticales y oblicuas (figs. 31, 32 y 33). Recordamos que ambos vuelos fueron manuales, por lo que las tomas no son homogéneas, ni tienen un control preciso de separación entre cada una de ellas, aun cuando logró obtenerse una cobertura bastante aceptable.

Sitio Teteles de Loma Larga, Puebla

VANT: DJI *Phantom 2* v.2.
 Cámara: Canon PowerShot S100.
 Resolución: 4000x3000 píxeles.
 Distancia focal: 5.2 mm.

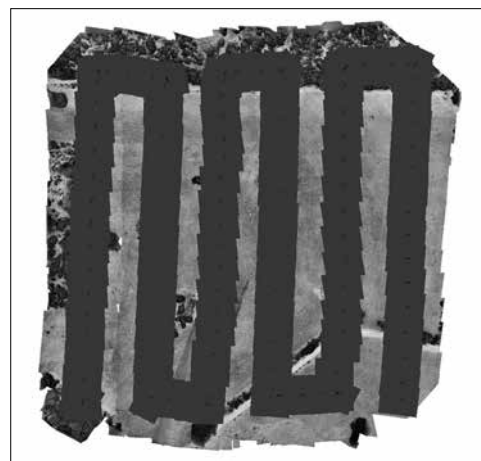
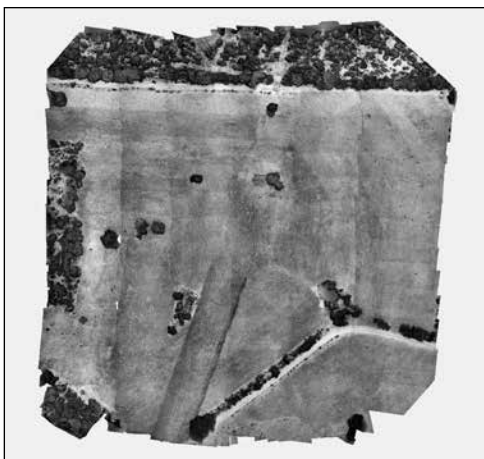
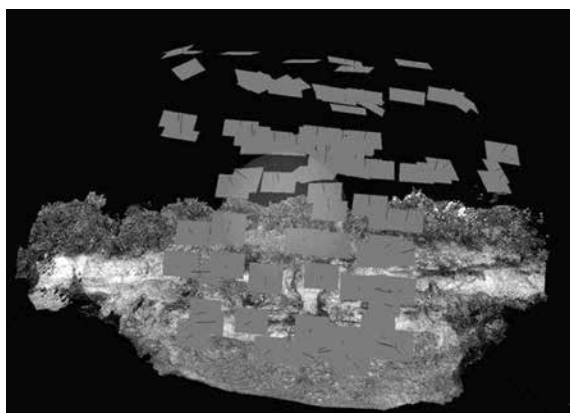


Fig. 29 El Zapote, Guanajuato, representación de las líneas de vuelo. Nótese que en las zonas ubicadas entre cada transecto se generan espacios abiertos y líneas irregulares, que son resultado de un traslape lateral no adecuado.



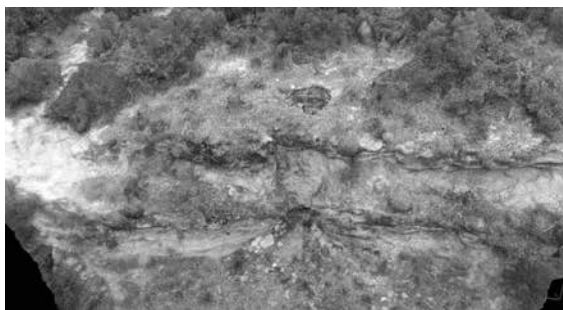
● Fig. 30 El Zapote, Guanajuato. Foto aérea texturizada que se consiguió, la que no se pudo seguir procesando para obtener la ortofoto.



● Fig. 31 Los cuadros representan las posiciones de la cámara: las inferiores corresponden a tomas horizontales, las superiores fueron tomas verticales y oblicuas, todas ellas capturadas en un vuelo en modo manual.

Método: Automático.
 Altura del vuelo: 47 m.
 Número de puntos terrestres de control: 3.
 Número de imágenes: 165.
 Nube de puntos básica: 33 756.
 Nube de puntos densa: 102 105 741.
 Superficie mapeada: 7.95 ha.
 Error: 1.95 m.

En el marco del Proyecto Arqueológico Región de Tlacotepec-Xochitlán, Puebla, el sitio arqueo-

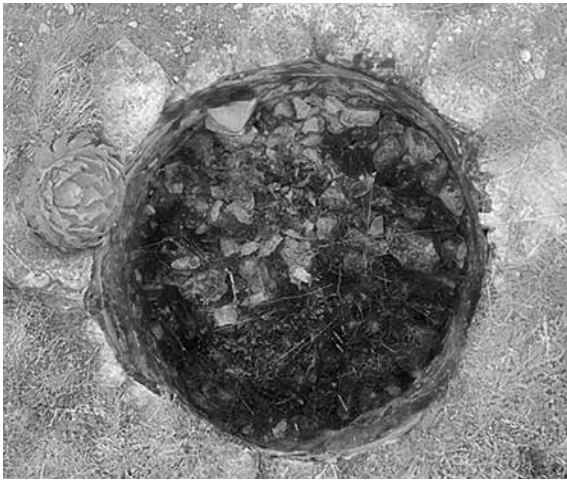


● Fig. 32 Modelo 3D del Horno Hornitos. Vista vertical donde se aprecian los pasillos excavados en las paredes de la barranca, así como su boca y tiro.

lógico Teteles de Loma Larga fue mapeado en 2013; los trabajos se realizaron con un teodolito y dos estadales, el trabajo en campo fue de seis días y el proceso de los datos se llevó a cabo en un día más, o sea, una semana de trabajo. En los trabajos topográficos intervinieron cuatro personas.

Con la finalidad de hacer una comparación entre el método tradicional de levantamiento y el que se expone en este documento, se realizó un vuelo con VANT en el mismo asentamiento; la misión fue hecha en una hora, mientras en el proceso fotogramétrico y de edición se emplearon alrededor de ocho horas. El levantamiento lo hicieron dos personas, una de ellas a cargo de la programación y seguimiento del vuelo, y la otra a cargo del control del VANT (por seguridad). La diferencia es clara en cuanto al tiempo empleado para obtener el plano final, aunado al número de personas que participan en los dos levantamientos; este último aspecto es importante, ya que también existe una diferencia notable en los recursos aplicados en uno y otro caso.

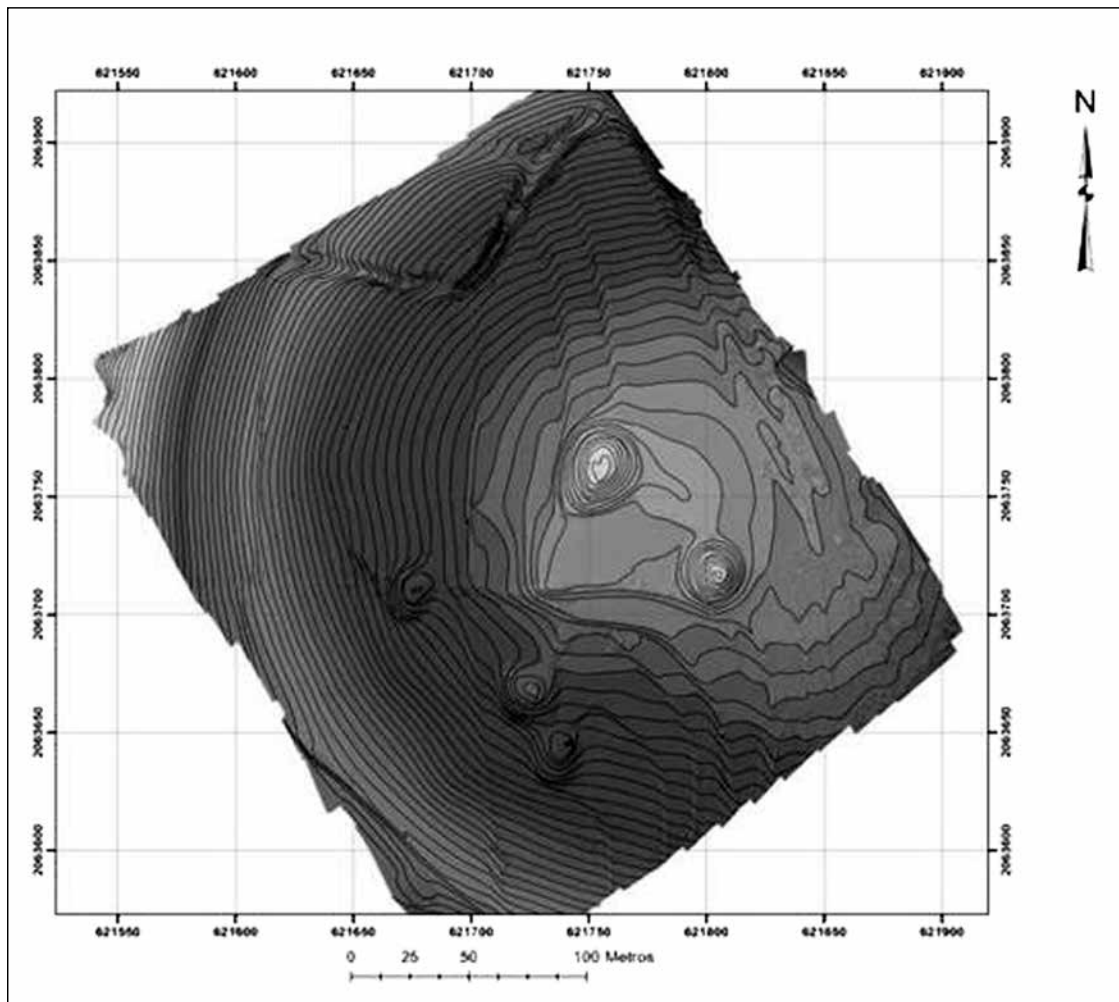
A continuación se exponen los resultados de ambos trabajos con los modelos digitales de terreno con curvas de nivel; en la figura 35 se muestra el plano generado con teodolito con equidistancia entre curvas de un metro. En el caso del levantamiento con VANT, la diferencia de nivel entre cada curva es de 0.5 m (fig. 34). Además, con el proceso fotogramétrico también se obtuvo una ortofoto del sitio, lo cual no es posible con el método tradicional (fig. 36).



© Fig. 33 Modelo 3D, detalle del interior del tiro.

Conclusiones

Se ha presentado la sistematización de un esfuerzo inicial por conocer y aplicar un procedimiento técnico más que apoya las labores arqueológicas en campo; un medio que, junto con otros, sirva para interpretar los antiguos desarrollos y cuya utilidad se potencia cuando las condiciones ambientales, del terreno y los vestigios lo permiten. Este artículo conforma un testimonio de las ventajas de manejar el recurso expuesto para conseguir representaciones espaciales de calidad en poco tiempo, así como la posibilidad de obtener información espacial diversificada a partir del procesamiento de datos georreferenciados que conforman una valiosa fuente de información. De



© Fig. 34 Levantamiento con VANT, fotogrametría en *PhotoScan* 1.1.6., procesado con *ArcGis* 10.1.

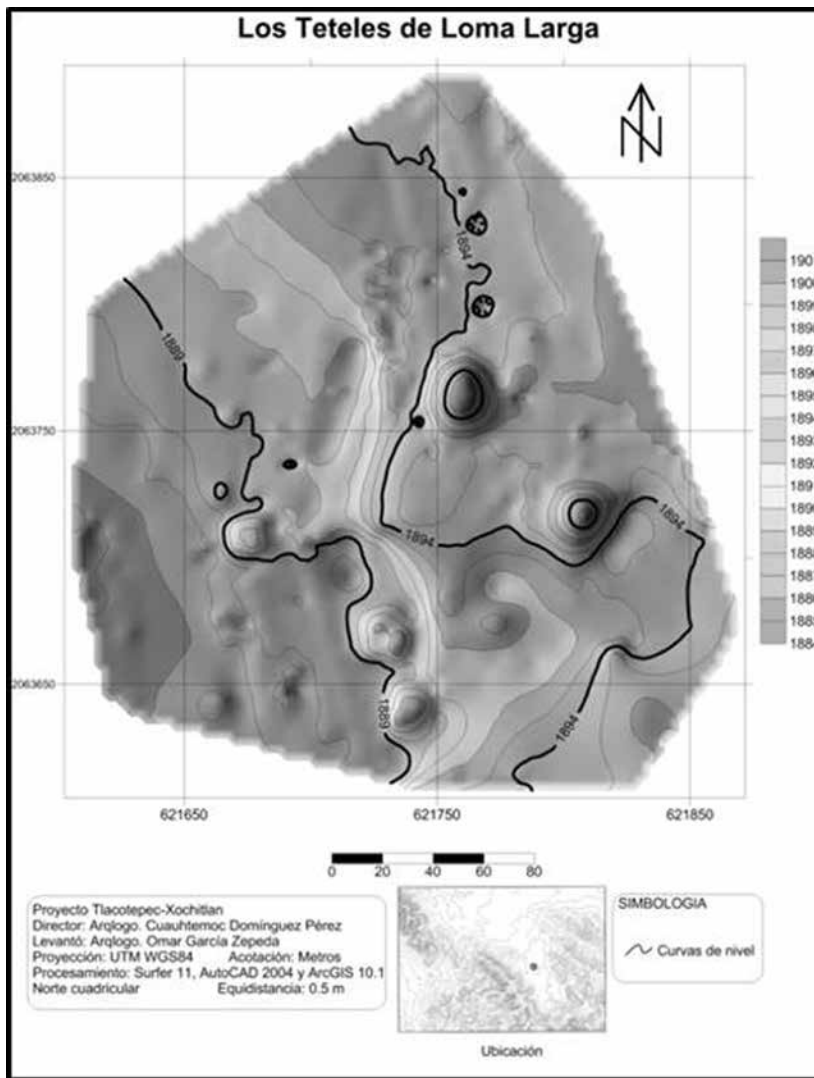


Fig. 35 Levantamiento topográfico realizado con teodolito, procesado en Surfer 11, AutoCAD 2004 y ArcGIS 10.1.

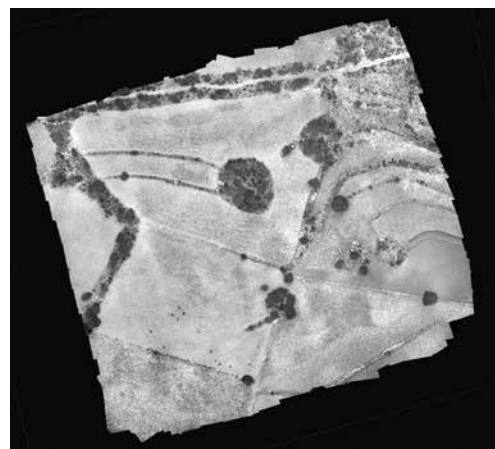


Fig. 36 Ortofoto obtenida mediante proceso fotogramétrico (PhotoScan 1.1.6).

este modo su beneficio es vasto y, sobre todo, se valora desde la óptica del servicio que ofrece ahorrando tiempos y recursos, sin dejar de lado la precisión de sus resultados.

Los modelos generados con vuelos de VANT ofrecen grandes expectativas para la arqueología, y su manejo adecuado puede ser muy provechoso, pues brindan la posibilidad de hacer tomas específicas que estarán sujetas a la problemática particular de cada proyecto de investigación en que se pretenda hacer uso de esta herramienta. Por ejemplo, se pueden emplear para trabajos de delimitación o prevención, así como en la elaboración de diagnósticos concretos: el impacto que sobre los asentamientos arqueológicos puedan tener tierras de cultivo, áreas de interés geológico, zona de obras y, por supuesto, el avance urbano. No debe olvidarse que se pueden hacer levantamientos de estructuras en 3D, barridos de muros o levantamientos verticales de fachadas, pinturas o petrograbados, además de la posibilidad de acceder a lugares que por otro medio sería más complicado, por señalar algunas prácticas.

A pesar de la inexistencia de un procedimiento explícito para el uso de drones en nuestro ámbito y disciplina, de ningún modo se pretende que este documento se vea como un manual, pues las características esenciales de su aprovechamiento estarían conformadas por aspectos como la habilidad del operador, la capacidad de entender el territorio a prospectar y la forma en que se valoran o ponderan una serie de circunstancias técnicas, climáticas, orográficas e incluso sociales, lo que por supuesto no se asimila con ninguna lectura, sino con el aprendizaje —en ocasiones de muchos años— no sólo en el uso de estos vehículos, sino de nuestra disciplina en general.

Indudablemente, lo expuesto no representa una solución infalible y existen inconvenientes y limitaciones en su uso, además de la opinión de quien pueda desaprobarlo; sin embargo, pensamos que por el momento —y si se tiene la posibilidad para hacerlo— se puede emplear este recurso en espera que mejoren o se generen otras condiciones en materia de representaciones espaciales. De igual forma, se debe tener presente que los resultados obtenidos mediante el uso de los drones pueden ser llamativos, pero no dejan de ser una herra-

mienta más de trabajo —y por ello su empleo no debe ser visto como objetivo final.

La aplicación masiva de los drones en arqueología está a la vuelta de la esquina, impulsada por mejoras técnicas que, entre otras cosas, permiten una autonomía de vuelo cada vez mayor, pero también porque la precisión y calidad de los modelos producidos con VANT se acerca mucho a métodos bastante más costosos y de acceso más complicado como el LIDAR; y si bien existen inconvenientes —como el suprimir la vegetación alta—, esto es subsanado medianamente por interpolaciones matemáticas de software especializados en fotogrametría; asimismo en sectores con deficiencias de cobertura en el plano, existe la posibilidad de completar con el trabajo mínimo de una estación total.

Con base en todo lo señalado, sería importante pugnar para que se tenga acceso institucional a esta tecnología, accesible en todos sentidos, y que sin duda es provechosa.

ANEXO

Revisión del plan de vuelo

Entorno

- Compruebe si hay personas, animales, árboles, líneas eléctricas en la zona de vuelo.
- Notifique a las personas que se encuentren en las inmediaciones y al dueño del terreno sobre sus intenciones de volar en el área.
- Si vuela en FPV,²⁵ discutir el plan de vuelo con el ayudante.
- Si vuela en un espacio aéreo controlado, notifique a la autoridad del espacio aéreo sobre la misión.

²⁵ Por sus siglas en inglés *First Person View* (Vista en primera persona), sistema de transmisión y recepción del video capturado por la cámara, en tiempo real. Comúnmente consiste en conectar la cámara a un transmisor de video pequeño montado en el VANT y un receptor con una pequeña pantalla para que el usuario la pueda cargar y ver mientras acciona el control remoto, gran apoyo para el encuadre de fotografía y video durante un vuelo.

Inspección de equipo

- Checar tornillos, sujetadores, bandas, correas y vínculos.
- Percatarse de que no existan alambres sueltos o dañados.
- Observar que no existan conexiones sueltas o dañadas (soldadura, enchufes, etc.)
- Inspeccione hélices y monturas.
- Para FPV, inspeccionar que el dispositivo y el lente de la cámara estén limpios; verificar que la cámara esté asegurada.
- Revisar que la batería esté completamente cargada, colocada y asegurada correctamente.
- Las hélices deben de estar lisas, libres de daños y defectos y bien apretadas.

Antes del vuelo

- Posición adecuada para el despegue, buscar un lugar conveniente para hacerlo, de preferencia un sitio más alto donde se pueda dominar toda el área de la misión.
- Para FPV, encienda la estación terrestre, receptor de vídeo, gafas, etc.
- Encender la cámara.
- Todos los interruptores del transmisor en posición correcta. (S1 y S2 en posición OFF y GPS, respectivamente).
- Radio transmisor encendido (control).
- Transmisor de aceleración en cero.
- Encienda el multirrotor.
- Para FPV, compruebe vídeo en gafas.
- Iniciar grabación de la cámara.
- Compruebe de nuevo la ubicación de las personas y/o animales cercanos.

Despegue

- Incrementar la velocidad del acelerador de manera gradual y de forma constante.
- Elevar y estabilizar el dron a una altura de 2 m sobre el punto de despegue, esperar de 15-20 s para comprobar que todo funciona y que el aparato permanece estable y obedece las señales del control.

Después del aterrizaje

- Apagar motores.
- Detener grabación de la cámara.
- Apagar la cámara.
- Apagar el multirrotor.
- Apagar el radio transmisor.

Bibliografía

- Acosta, Guillermo, Emily McClung, Víctor Hugo García y Gerardo Jiménez
2015. “El empleo de imágenes infrarrojas y fotogrametría digital mediante dron en el estudio de chinampas arqueológicas de Xochimilco”. *Boletín Antropológicas*, 3 (59).
- *Agisoft PhotoScan User Manual. Version 1.0*
2014. Recuperado de http://fieldofviewllc.com/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/27_AGI-SOFT%20PHOTOSCAN%20PRO%20USER%20GUIDE.PDF el 27 de octubre de 2015.
- “CHDK”
2015. Recuperado de <http://chdk.wikia.com/wiki/Features> el 27 de octubre de 2015.
- “Controladora de vuelo”
2014. Recuperado de <https://droningpage.wordpress.com/2014/10/19/que-partes-componen-un-drone-multirrotor/> el 27 de octubre de 2015.
- “Curvas de nivel”
2015. Recuperado de <http://geocienciasipc.blogspot.mx/p/glosario.html> el 27 de octubre de 2015.
- “DataLink”
2015. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Enlace_de_datos el 28 de octubre de 2015.
- Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC)
2015. “Circular obligatoria que establece los requerimientos para obtener un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS)”. México, DGAC-SCT.
- DJI
2015. *Ground Station Wireless Data-link User Manual*. Recuperado de <http://www.sekidorc.com/>

pdf/GS_UserManual_en_v3.04_150508.pdf el 28 de octubre de 2015.

• Doneus, M., G. Verhoeven, M. Fera, Ch. Briese, M. Kucera y W. Neubauer
2011. "From Deposit to Point Cloud: A Study of Low-cost Computer Vision Approaches for the Straightforward Documentation of Archaeological Excavations". *Geoinformatics*, 6: 81-88. Recuperado de <https://biblio.ugent.be/publication/2038452>.

• Eisenbeiss, Henri; Karsten Lambers, Martin Sauerbier y Zhang Li
2005. "Photogrammetric documentation of an Archaeological site (Palma, Peru) Using an Autonomous Model Helicopter". Ponencia para el XX International CIPA Symposium. 26 de septiembre-1 de octubre, Turín, Italia.

• "Estación total"
2015. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Estaci%C3%B3n_total el 28 de octubre de 2015.

• Fahlstrom, Paul y Thomas Gleason
2012. *Introduction to UAV Systems*. Londres, John Wiley & Sons.

• Falker Edgar y Dennis Morgan
2001. *Aerial Mapping. Methods and Applications*. Washington, D.C., Lewis Publishers.

• Foster, Shaun y David Halbstein
2014. *Integrating 3D Modeling, Photogrammetry and Dissing*. Nueva York, Springer.

• "Fotografías aéreas"
2015. Recuperado de <http://www.kumbaya.name/ci2412/gps/mapas/4-2-Fotografias-aereas.pdf> el 27 de octubre de 2015.

• Gonizzi Barzanti, S., F. Remondino y D. Visintini
2013. "3D Surveying and Modeling of Archaeological sites: Some Critical Issues". *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (volume II-5/W1, pp. 145-150). Actas del XXIV International CIPA Symposium. 2-6 de septiembre, Francia, Estrasburgo.

• "Índice K"
2015. Recuperado de http://www.dxmaps.com/propindex_e.html el 28 de octubre de 2015.

• INEGI
2005. *Guía para la interpretación de cartografía. Fotografía aérea*. Aguascalientes, INEGI.

• "Intervalómetro"
2004. Recuperado de <http://www.caborian.com/20041231/diccionario-de-terminos-fotograficos> el 28 de octubre de 2015.

• "LiPos"
2014. Recuperado de <https://droningpage.wordpress.com/2014/10/19/que-partes-componen-un-drone-multitrotor/> el 27 de octubre de 2015.

• Modelo digital de elevación (MDE)
2015. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx> el 27 de octubre de 2015.

• "Modelo digital de terreno" (MDT)
2015. Recuperado de <http://geocienciasipc.blogspot.mx/p/glosario.html> el 27 de octubre de 2015.

• "Nube de puntos"
2015. Recuperado de <http://www.gim-geomatics.com/nube-puntos> el 27 de octubre de 2015.

• Oczipka M.; J. Bemann, H. Piezonka, J. Munkabayar, B. Ahrens, M. Achtelik y F. Lehmann
2009. "Small Drones for Geo-archaeology in the Steppe: Locating and Documenting the Archaeological Heritage of the Orkhon Valley in Mongolia". *Proceedings of SPIE*. 7478. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/252914183_Small_drones_for_geoarchaeology_in_the_steppe_Locating_and_documenting_the_archaeological_heritage_of_the_Orkhon_Valley_in_Mongolia el 27 de octubre de 2015.

• "Ortofoto"
2015. Recuperado de <http://geocienciasipc.blogspot.mx/p/glosario.html> el 27 de octubre de 2015.

• Peinado, Zaira, Angélica Fernández y Luis Hernández
2014. "Combinación de fotogrametría terrestre y aérea de bajo coste: el levantamiento tridimensional de la iglesia de San Miguel de Ágreda (Soria)". *Virtual Archaeology Review*, 5 (10): 51-58.

- “Pixel”
2015. Recuperado de <http://www.caborian.com/diccionario-de-terminos-fotograficos/> el 28 de octubre de 2015.
 - “Plugin”
2015. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Complemento_%28inform%C3%A1tica%29 el 27 de octubre de 2015.
 - “Punto de control”
2015. Recuperado de <http://redgeomatica.rediris.es/cartoprofesores/Fotogrametria/ApuntesFotogrametria3.pdf> el 27 de octubre de 2015.
- “Recurren a drones como arqueólogos”. *Diario Reforma*. 21 de agosto de 2014.
- Valavanis, Kimon P. y George J. Vachtsevanos
2015. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Nueva York/Londres, Springer.
 - “Xdrones”
2015. Recuperado de <http://www.xdrones.es/2015/05/que-son-los-uavs-yo-drones> el 17 de noviembre de 2015.

