



**II CONGRESO NACIONAL
DE RIEGO Y DRENAJE COMEI 2016**
Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

**LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE VASOS DE ALMACENAMIENTO CON
VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS**

S. Pérez Nieto^{1*}; F. R. Hernández Saucedo¹; H. Flores Magdaleno²; F. Rivera Toral³

¹Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Carr. México-Texcoco km 38.5, 56230, Chapingo, Estado de México, México. speren@correo.chapingo.mx. (*Autor para correspondencia)

²Programa de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Carr. México-Texcoco km 33.5, 56230, Montecillo, Estado de México, México.

Resumen

Para la definición de la factibilidad técnica y económica de una obra de almacenamiento, así como para su proyecto ejecutivo, deben realizarse estudios topográficos, geológicos, de mecánica de suelos, hidrológicos, agrológicos y socioeconómicos, entre otros; de los cuales los topográficos no solo son muy importantes, sino que son los primeros que deben realizarse, porque con ellos se obtienen los planos que permiten generar los demás. Los trabajos topográficos se deben realizar para la Cuenca de Captación, el Vaso de Almacenamiento y la Boquilla; para el caso del Vaso de Almacenamiento se realizan ordinariamente empleando el Procedimiento Topográfico de Poligonales y el Método de Radiaciones, con precisiones lineales del orden de 1/5,000 y para obtener su configuración mediante curvas de nivel equidistantes verticalmente 1.0 m, de modo que se cumpla con sus objetivos, que son conocer, las áreas inundadas y los volúmenes almacenados a distintas alturas de la cortina, así como las áreas afectadas con el futuro embalse. Con el presente trabajo, se realizaron los levantamientos topográficos de los vasos de almacenamiento de las presas La Botella, municipio de San Ignacio y La Culebra, municipio de Choix, en el estado de Sinaloa, México, empleando un vehículo aéreo no tripulado, que adquiere y procesa imágenes estereoscópicas, a cada 5 cm, empleando como referencia y para verificación, puntos de control y apoyo terrestres, con lo que, una vez discriminados los puntos ajenos al suelo, se obtuvieron las coordenadas UTM de una nube densa de puntos para configuración, que permitieron laborar los planos de los vasos, con excelentes resultados y precisiones, que permiten recomendarlos ampliamente para este tipo de trabajos.

Palabras clave adicionales: estudio topográfico, dron, vaso de almacenamiento



Introducción

1. Estudios topográficos para Obras de Almacenamiento y sus objetivos

Para el proyecto, diseño, construcción y operación de obras hidráulicas de almacenamiento, se deben realizar una serie de estudios, para contar con información de gran importancia para la planeación más adecuada de cada una de estas etapas; tales estudios son: hidrológicos, agrológicos, meteorológicos, geológicos, de mecánica de suelos, socioeconómicos, de tipo constructivo y, por supuesto, topográficos; estos últimos, juegan un papel por demás importante y definitorio, ya que son de hecho por los que se inicia, previendo de información necesaria para la realización de los otros y, además, invariablemente se requiere de apoyo topográfico durante el proceso constructivo de una obra (Pérez y Hernández, 2016).

Los estudios topográficos se deben realizar para la Cuenca de Captación, el Vaso de Almacenamiento, la boquilla y para la zona de riego, diferenciándose por sus objetivos, precisión y los Procedimientos, Métodos e Instrumentos Topográficos empleados. La Cuenca de Captación se estudia para determinar su área y otros parámetros fisiográficos como la longitud y pendiente de sus cauces principales, para apoyar los estudios hidrológicos y determinar la magnitud del volumen de almacenamiento medio anual y la avenida máxima, por lo que su precisión lineal, cuando se emplean instrumentos tradicionales puede ser de hasta 1/500, la cual se rebasa sobradamente cuando se emplean los instrumentos de estación total (ET) o de posicionamiento global (GPS) por el método de Real Time Kinematic (RTK) o diferencial con posproceso, que son hoy día los más comúnmente empleados; ello, sin considerar que los objetivos del levantamiento se pueden cumplir completamente empleando y analizando imágenes de satélite, de las que hay disponibles muchas y diversas fuentes en la actualidad, por lo que lo común, es que es el estudio topográfico de campo no se realiza.

El estudio topográficos del Vaso de Almacenamiento por otra parte, tiene como objetivos la estimación de las áreas inundadas y los volúmenes almacenados a diferentes elevaciones de la cortina, lo que permitirá, en conjugación con la información hidrológica, definir su altura; generar un plano de las áreas inundadas que permita estimar las afectaciones y las indemnizaciones en su caso; y elaborar un plano que sirva de base para los estudios de permeabilidad del área del embalse (Pérez y Hernández, 2016). Para el efecto se debe levantar información de tantos puntos ubicados en los cambios de magnitud y dirección de la pendiente del terreno, para poder dibujar su configuración con curvas de nivel equidistantes verticalmente 1.0 m; lo cual, se puede lograr adecuadamente empleando el Procedimiento Topográfico de Poligonales (Cerradas o Abiertas o bien en combinación) y el Método de Radiaciones o de Puntos Aislados, con el empleo de los equipos de ET y aun con GPS, con los cuales, se pueden obtener con facilidad, las precisiones mínimas aceptadas para equipos tradicionales, definidas en 1/5,000 para el caso de la lineal.



Y el levantamiento topográfico de la boquilla, se hace con la finalidad de elaborar un plano que sirva de base para el diseño de las cortina y sus estructuras y para los estudios de geotecnia, así como para establecer Puntos y Líneas de Control y Apoyo (PLCA) para los estudios definitivos para el proyecto ejecutivo y para dar líneas y niveles al momento del proceso constructivo; por lo que la precisión lineal que se plantea como mínima, si bien cuando se emplean instrumentos tradicionales es de 1/10,000, que se rebasa con toda facilidad empleando equipos de ET y siguiendo el Procedimiento Topográfico de Poligonales y el Método de Radiaciones para el levantamiento de Puntos para Configuración y de Detalles.

Cuando el terreno está muy accidentado, pero sobre todo, cuando tiene mucha cobertura vegetal, el uso equipos de ET y aun de GPS, pueden complicarse o, al menos resultar muy lento y costoso, por lo que el empleo de la tecnología que incluye el uso de los vehículos aéreos no tripulados, puede constituir una excelente alternativa, considerando particularmente, la enorme densidad de imágenes que se obtienen y que permite discriminar las áreas cubiertas y aun tener suficiente y sobrada información para la configuración del terreno, que es lo que se mostró con el presente trabajo, desarrollado para el estudio topográfico de los vasos de almacenamiento de la presas La Botella, municipio de San Ignacio y La Culebra, municipio de Choix, en el estado de Sinaloa, México.

2. Definición y clasificación de los Vehículos Aéreos No Tripulados

Un vehículo aéreo no tripulado (VANT), o UAV por sus siglas en el idioma inglés (Unmanned Aerial Vehicle), es una aeronave que es capaz de volar a control remoto o bien a través de un programa preestablecido mediante un software especial. La primera aeronave radiocontrolada y dirigida en vuelo recto y que alcanzó más de 80 km fue desarrollado por el gobierno de EU, empleando el estabilizador giroscópico creado por Peter Cooper Hawitt y Elmer A. Sperry. Estos equipos cuentan con equipos de medición de última generación como sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores infrarrojos, cámaras de alta resolución y controles de radares; y son capaces de enviar información detallada a satélites, que luego la dan a conocer al control de tierra, todo en cosa de milésimas de segundos.

Los Sistemas en VANT se integran por los dos segmentos siguientes claramente definidos:

- Segmento de Vuelo (SV), está formado por el Vehículo Aéreo y los sistemas de recuperación que se ocupan para el (aterrizaje sobre ruedas o patines, red, cable y paracaídas).
- Segmento de Tierra (ST): formado por la Estación de Control que se localiza en tierra y, recibe la información enviada por el drón y les da indicaciones.

Según Esteban (2015), después de la segunda guerra mundial, la compañía Radioplane, desarrolló los vehículos denominados Falconer que continuó mejorando en las décadas siguientes adoptando sistemas de control cada vez más

evolucionados y la empresa Hydra Technologies de México presentó en 2007 en París, el Dispositivo S4 Ehécatl o “Dios del Viento” (Figura 1) que le valió el reconocimiento Al Contribuidor Sobresaliente otorgado por la Asociación Internacional para Sistemas de Vehículos No Tripulados (AUVSI, por sus siglas en inglés), y posteriormente recibió de la comunidad aeronáutica mexicana el premio Leonardo Da Vinci en el marco del Congreso Internacional de Aviación CIAM 2008



Figura 1. Vehículo no Tripulado S4 Ehécatl o “dios del viento”, desarrollado en México.

De acuerdo con Fernández y Gutiérrez, (2016), los drones pueden clasificarse por su aerodinámica en los siguientes dos tipos, de los que se muestra una imagen en la figura 2:

- 1) Dron de ala fija (figura 2a.). Se caracterizan por alcanzar grandes distancias de vuelo con autonomías de hasta 60 km y una hora de vuelo; pueden superar los 500 m de altura y velocidades comprendidas entre 50 y 70 km/h, los despegues se realizan desde una plataforma metálica inclinada un cierto ángulo, mientras que los aterrizajes son por impacto directo contra el suelo; los sensores o dispositivos de toma de imágenes o cámara se colocan en posición fija, cenital u horizontal y poder ser para fotos, vídeo, LiDAR, etc; lo que los hace especialmente versátiles para la elaboración de cartografías y toma de ortoimágenes de superficies extensas
- 2) Dron de ala rotativa (Figura 2b). Presentan una menor autonomía en torno a los 30 minutos de vuelo y distancias por debajo de los 10 km; presentan entre 4 y 8 hélices con longitudes de ala que superan el metro; pueden girar sobre sí mismos en distancias muy cortas, lo que los hace especialmente versátiles para trabajos verticales.



Figura 2. Ejemplo de drones de ala fija y de alas rotativas

3. Uso de drones en ingeniería

El uso de los drones, se inició para fines militares al final de la segunda guerra mundial para localización del enemigo y para programar el ataque (De la Cruz, 2012), y había estado limitado a esas tareas, hasta la década actual que se liberaron al uso civil, en que uno de los usos más comunes en ingeniería es en la adquisición de imágenes (simples o estereoscópicas), como lo ilustra la imagen de la figura 3, con lo cual, la producción de ortofotos y Modelos Digitales de Elevación (MDE) se convirtió en digital y prácticamente en tiempo real; pero, en coincidencia con la Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, en el ámbito civil, los VANT se utilizan en diferentes tareas como la inspección de infraestructuras, topografía, gestión y control de riesgos (tales como incendios), exploración de lugares de difícil acceso, comunicación y entretenimiento, control de tráfico, monitoreo y combate de enfermedades en zonas agrícolas y forestales mediante la aplicación de pesticidas y el traslado de pequeños paquetes.

Según el uso de los drones en cartografía, permiten la toma de imágenes con alto nivel de detalle de zonas con corta extensión, las cuales, son usadas para obtener la cartografía del sitio en estudio, obteniendo una base de datos que se pueden actualizar constantemente en periodos de tiempo relativamente cortos; y en topografía es posible aumentar la productividad, ya que se puede cubrir grandes extensiones de terreno en tiempo reducido y por ende un ahorro de recursos significativo; en tanto que su uso en geología, presenta numerosas ventajas para la obtención de información de los afloramientos, el cálculo y análisis de diferentes parámetros sobre la superficie terrestre o el estudio de las formas del terreno, entre otros.

4. Los drones en la Topografía

En los estudios Topográficos con un dron, el terreno se escanea con una cámara o sensor instalado sobre él, obteniéndose imágenes estereoscópicas, que se

procesan en gabinete para obtener un modelo 3D con resolución centimétrica y una precisión de entre 1 y 5 cm según se requiera (Soler, 2016), lo cual es muy apropiado para vasos de almacenamiento, y podría no ser suficiente para el levantamiento de las boquillas. Este último autor, refiere que las ventajas de los drones para los trabajos topográficos son las siguientes:

- **Seguridad.** No es necesario que el operario lleve personalmente el equipo a lugares arriesgados, pues su trayecto es por aire.
- **Mayor Cobertura.** Se puede acceder a puntos que son inaccesibles para las personas y con equipos terrestres.
- **Más información.** Un levantamiento tradicional consigue determinar una serie de puntos que sirven para crear un plano preciso. El levantamiento topográfico de un dron captura a la vez millones de puntos y le añade además la información de color de las fotografías, con lo que consigue nubes de puntos de alta resolución que muestran la apariencia real del terreno.

Cuando se utilizan drones para un levantamiento, cambia la forma de trabajar. No es necesario definir una serie de puntos a medir, sino que se levanta en campo y se modela en gabinete de una vez toda el área de trabajo, y luego la posición de los puntos necesarios se hace determinando sus coordenadas con el empleo del modelo. Esto también tiene la ventaja de que se elimina la necesidad de tener que volver a hacer trabajo de campo si hacen falta nuevas medidas.

La visión estereoscópica por computadora es la extracción de información en 3D a partir de las imágenes digitales y la reconstrucción 3D es el proceso mediante el cual se reproducen los objetos reales manteniendo sus características físicas, tales como dimensiones, volumen y forma; para ello existen diversas técnicas, todas las cuales emplean algoritmos que realizan la conexión del conjunto de puntos representativos del objeto en forma de elementos de superficie y su eficiencia define la calidad de la reconstrucción.

Para el trabajo de campo, el dron se debe pre programar con WayPoints, para hacer un barrido paralelo del terreno, como lo muestra la imagen de la figura 3; la cámara deberá de ir tomando fotografías en time-lapse y se deberá activar la función de etiquetar las fotos con la posición GPS. En caso de no contar con una cámara con GPS, las fotografías deberán ser etiquetadas manualmente, sacando el log de navegación o armando una solución más rebuscada, que consistiría en comprar sistemas externos que etiqueten las fotografías, cuando sean tomadas por la cámara

A este respecto Ubieto (2009) refiere que el objeto de la visión estéreo es resolver dos problemas: el primero consiste en hallar la correspondencia de un mismo punto físico en las dos imágenes estereoscópicas; y el segundo se refiere a encontrar las

coordenadas geográficas de un punto dadas las dos vistas del mismo en las imágenes estereoscópicas.

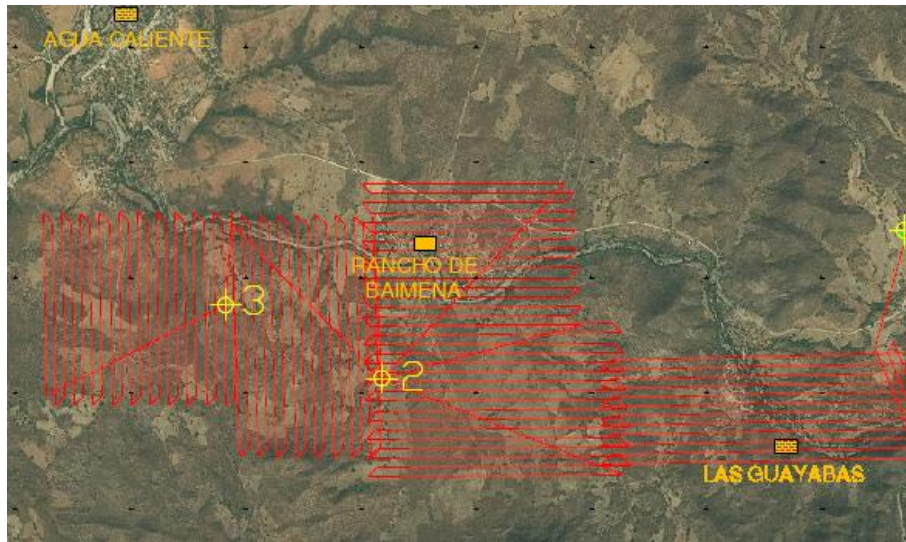


Figura 3. Secuencia en la que se toman las imágenes con un dron.

La generación de la estructura tridimensional a partir de imágenes bidimensionales se conoce como SFM que significa en el idioma inglés structure from motion y utiliza dos o más imágenes y la trigonometría eliminando la necesidad de conocer la posición de la cámara, pues se calcula por posición relativa, si bien implica la necesidad de usar puntos de control para ello, pues la reconstrucción de la escena se hace en forma arbitraria, lo que significa que la distancia entre puntos 3D y la cámara son consistentes pero no métricas (Dietrich, 2014).

Así pues, para obtener modelos digitales en 3D de las superficies, con secuencias de imágenes 2D e información de sensores de movimiento, éstas son analizadas por algoritmos computacionales, que realizan una triangulación de los puntos superpuestos de las imágenes, usando su posición geográfica relativa. Este método que se puede denominar fotogrametría digital permite obtener información topográfica, tal como el MDE y de superficie, y nubes de puntos, requiriéndose únicamente fotografías aéreas etiquetadas con la posición geográfica donde fue tomada; de esta manera, un software especializado, de los cuales hay una amplia variedad en el mercado, puede hacer todo el trabajo; una dificultad es que, generalmente no son muy accesibles desde el punto de vista económico.

El Agisoft Photoscan es un software de escritorio para procesar imágenes digitales mediante la combinación de fotogrametría digital y visión por computadora para generar una reconstrucción 3D del entorno, por lo que es adecuado para la documentación fotogramétrica de edificios, yacimientos y objetos arqueológicos, compitiendo y en ocasiones superando en eficacia y calidad de los sistemas LIDAR terrestres y aéreos; y por lo tanto es completamente aplicable al conocimiento de la configuración del terreno para todos los usos de la ingeniería agrícola.

En lo que se refiera a la productividad del equipo, Soler (2016) refiere que un dron estándar es capaz de cubrir en un día alrededor de 100 hectáreas de terreno, mientras drones más avanzados llegan sin problemas a levantar superficies del orden de las 5,000 hectáreas sin mayor complicación. A este respecto los drones se han utilizado para realizar trabajos topográficos, pues es mucho más económico en tiempo y costo, que comprar información LIDAR, contratar estaciones topográficas o rentar helicópteros para tomas aéreas y recomienda considerar la relación calidad/precio, pues mientras más precisión se necesite, la inversión monetaria será más grande.

Materiales y métodos

1. Localización de las áreas de estudio

Se levantaron topográficamente los vasos de almacenamiento de las pequeñas presas de almacenamiento La Botella, municipio de San Ignacio y La Culebra, municipio de Choix, en el estado de Sinaloa, México. La primera, se localiza sobre el Arroyo La Quebrada, y la boquilla se ubica en las coordenadas geográficas $106^{\circ} 34' 47.14''$ de longitud oeste, $23^{\circ} 45' 26.60''$ de latitud norte y 65 msnm; y segunda, se localiza sobre el Arroyo Las Higueras, teniendo como coordenadas geográficas en la boquilla de $108^{\circ} 17' 22.94''$ de longitud oeste, $26^{\circ} 30' 31.38''$ de latitud norte y 340 msnm. En la figura 4, se muestra la localización de ambos sitios.

2. Equipo utilizado para el trabajo de campo

El VANT usado, es el mostrado en la figura 5, considerado como una aeronave de ala fija con un tamaño de ala a ala de 1.90 m, modelo Skywalker, elaborado de espuma EPO reforzada; la cola y el fuselaje están unidas por un tubo de fibra de carbono; el manejo o control de la plataforma aérea se realiza mediante un sistema de control remoto de marca Turnigy 9Xpro; los modos de vuelo asistidos y autónomos son controlados por un autopiloto APM 2.6 como el mostrado en la figura 6, el cual incorpora una serie de sensores entre los que incluye un receptor GPS L1-code, una brújula FLUX-GATE, giroscopios y acelerómetros de 3 ejes MEMS, y un barómetro. La velocidad de crucero es de 13 m/s y la duración máxima de un vuelo por carga de baterías es de 100 min en el cual cubre 388 ha aproximadamente. Las imágenes generadas tienen una resolución espacial (tamaño de pixel) de 5 cm y puede transferir datos en tiempo real hasta por 40 km.

El plan de vuelo se generó con el Software Mission Planner; que es una aplicación de estación en tierra con todas las funciones de piloto automático; con su ayuda, se delimitó el área a volar mediante la definición de un polígono; se construyó la malla de vuelo en la que se especificó que el traslape frontal sería de 80%, el traslape lateral de 60%, y la altura de vuelo de 140 metros sobre el nivel del suelo y usando una cámara canon S110 de 12 megapíxeles. Además el software estimó entre otras cosas, la superficie de vuelo, tiempo de vuelo, número de fotos a tomar, el área que abarcó cada foto y la distancia de recorrido de vuelo. El aumento de las imágenes

en los traslapes dependió de las características físicas del terreno; por ejemplo, en áreas muy accidentadas, donde una de las dificultades más comunes fue el sombreado, se necesitaron mayores puntos en común en distintas tomas para garantizar una mejor reconstrucción de los objetos presentes en el sitio.



Figura 4. Localización de los sitios La Botella y La Culebra en el estado de Sinaloa.



Figura 5. VAN modelo Skywalker, empleado en el levantamiento aerofotogramétrico.

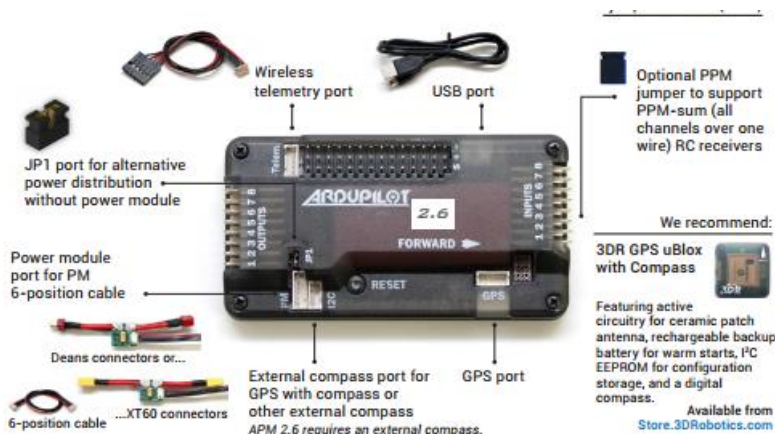


Figura 6. Autopiloto ArduPilotMega 2.6 (APM 2.6).

3. Procedimiento de trabajo de campo

Una vez terminada la planeación de la misión, ésta se envió al autopiloto del avión; los puntos de la ruta de vuelo le indicaron al VANT el recorrido que siguió de forma autónoma como se representa en forma esquemática en la figura 7 para el vaso de almacenamiento La Botella. Para cada Sitio se realizaron 3 misiones; el número de imágenes tomadas para cada uno de los vasos de almacenamiento estudiados son los que se listas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Número de misiones e imágenes generadas en cada sitio de estudio

VASO LA BOTELLA		VASO LA CULEBRA	
Misión	Núm. de imágenes	Misión	Núm. de imágenes
1	680	1	710
2	656	2	540
3	510		



Figura 7. Plan de vuelo para el vaso de almacenamiento de la presa La Botella.

Para calibración y verificación de los puntos levantados con el dron, se establecieron 12 puntos de control terrestre (PCT) para cada sitio, empleando un equipo GPS VIVA GNSS Leica, modelo GS15, que proporciona una precisión de 3 mm + 3 ppm y empleando el Procedimiento Diferencial con posproceso. Las coordenadas UTM de estos puntos se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Coordenadas UTM de los Puntos de Control Terrestre establecidos en ambos sitios de estudio.

SITIO LA BOTELLA				SITIO LA CULEBRA			
PUNTO	UTM X (m)	UTM Y (m)	Z (msnm)	PUNTO	UTM X (m)	UTM Y (m)	Z (msnm)
BASE 1	338,857.72	2,628,198.60	84.053	BASE1	770,079.72	2,934,858.20	328.829
BASE 2	336,495.06	2,630,456.44	72.006	BASE2	768,316.29	2,935,309.27	335.626
M 1	338,864.99	2,628,234.17	82.297	MD	770,128.24	2,934,939.28	352.807
M 2	338,903.61	2,628,120.50	84.719	J	770,351.97	2,934,711.79	335.366
M 3	337,491.24	2,628,926.88	62.263	K	770,680.43	2,934,820.60	341.134
M 4	337,363.63	2,628,749.63	60.613	L	770,924.37	2,934,971.98	349.149
M 5	336,496.83	2,630,455.19	71.942	M	770,314.57	2,934,453.96	339.754
M 6	336,518.48	2,630,190.32	59.04	N	770,380.55	2,934,118.45	343.929
M 7	335,226.68	2,629,477.84	51.131	O	770,532.62	2,933,710.61	350.54
M 8	335,356.61	2,629,192.76	51.864	P	770,589.11	2,933,567.28	354.506
M 9	336,142.06	2,629,795.43	57.663	Q	768,212.45	2,935,721.93	302.162
M 10	336,200.63	2,629,658.13	59.475	R	767,729.62	2,935,046.54	328.788

4. Trabajo de gabinete

El procesamiento de los datos se realizó con el Software Agisoft PhotoScan, que aplica una solución avanzada del modelado 3D basado en imágenes; opera con la última tecnología de reconstrucción 3D multivista. La mayor parte del procesamiento está completamente automatizado y sus objetivos finales son: obtener un mosaico ortorectificado y construir un modelo 3D texturizado del área de estudio.

Se cargaron las fotos y se posicionaron geográficamente haciendo uso del archivo EXIF indexado (información de coordenadas) en cada fotografía tomada que fueron las que se registraron con el GPS del dron. Se desearon las imágenes que presentaron alta oblicuidad y se aplicó un filtro de calidad de imagen al conjunto de imágenes cargadas, quedando sólo aquellas que cumplieran con el criterio de > 60% de calidad; lo cual ayudó a reducir el error en la alineación de las fotografías; el cual define iterativamente la localización y orientación externa e interna de la cámara a través de una solución de mínimos cuadrados y construye un modelo de nube de puntos 3D escasa. El software analiza las imágenes originales, detectando puntos estables y genera descriptores basados en puntos circundantes que son usados después para alinear las imágenes determinando el punto correspondiente en otras fotografías. Este proceso da resultado, entre otras cosas, la estimación de los valores del error de los PCT o valores de incertidumbre.

Se definieron los marcadores, que son los puntos en las imágenes que tienen las mismas coordenadas que los PCT establecidos con GPS y se usaron para optimizar la posición de las imágenes y la orientación de los datos, lo cual permitió obtener como resultados una mejor reconstrucción del modelo y una georeferenciación más precisa; también se usaron para generar ortofotos del área de interés precisa.

Conviene precisar, que una ortofoto, es una fotografía aérea geométricamente corregida (ortorectificada) de modo que la escala es uniforme, la foto tiene la misma falta de distorsión como un mapa, pero con una mejor resolución. A diferencia de una fotografía aérea sin corregir, una ortofoto se puede utilizar para medir distancias verdaderas, porque es una representación proyectada sobre una superficie plana.

En base a las estimaciones de las posiciones de las imágenes de la cámara, se construyó una nube de puntos densa como la de la figura 8 para el sitio La Culebra, que contiene al menos 20,000 puntos por m^2 , con sus coordenadas, la cual fue editada y clasificada antes de exportarla para proceder a la generación de modelos de malla 3D.

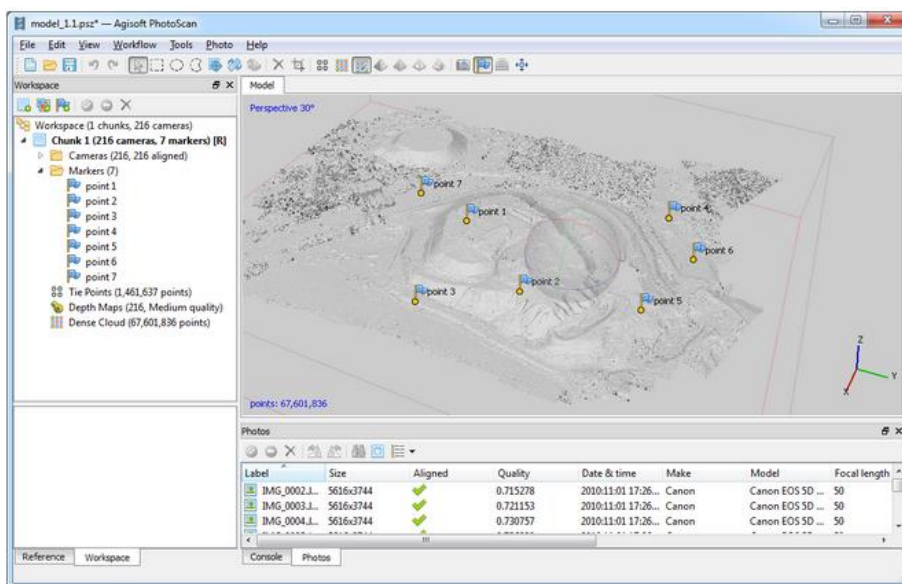


Figura 8. Construcción de la nube de puntos densa para el sitio la Culebra.

Resultados y discusión

Como productos finales del trabajo se obtuvo, para cada sitio, un ortomosaico de fotografías del área levantada con un tamaño de pixel de 5 cm, como se muestra en la figura 9 para el sitio La Botella; por lo tanto la precisión máxima obtenida en el plano horizontal es de 50 mm y en altimetría de entre 100 a 150 mm. Dichas precisiones son mayores y por lo tanto aceptables para este tipo de trabajos.

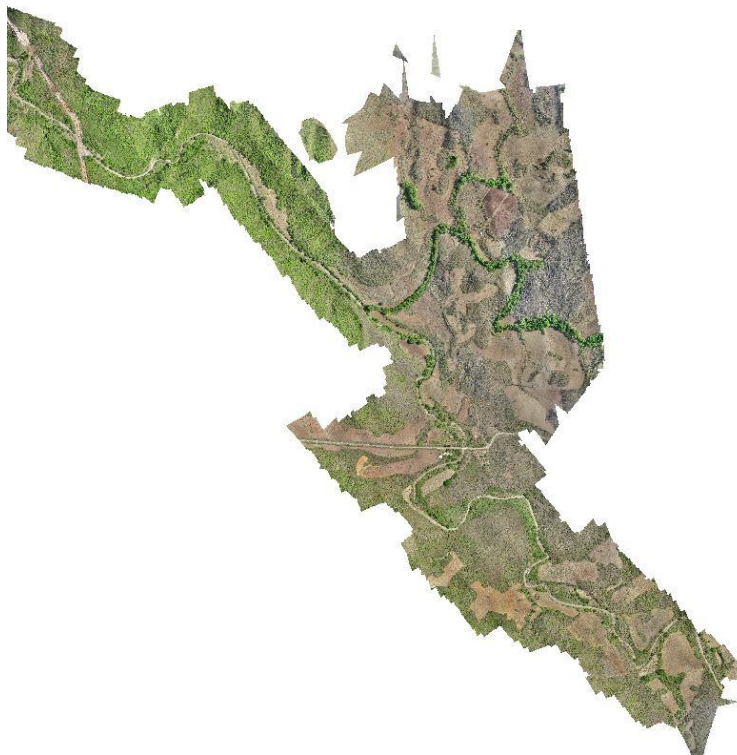


Figura 9. Ortomosaico de la zona del vaso de almacenamiento de la presa La Botella.

También se generó una malla de puntos de suelo con coordenadas X,Y,Z con un espaciamiento a cada 10 m y a partir de ella se generaron curvas de nivel con una equidistancia de 1.0 m y se elaboró el plano topográfico del vaso de almacenamiento, que se muestra en la figura 9 para el sitio La Botella y en la 10 para el sitio La Culebra. Dichos planos mostraron que el empleo de esta técnica es muy adecuada para el cumplimiento de los objetivos del levantamiento de vasos de almacenamiento y su uso es particularmente conveniente cuando la cobertura vegetal es amplia.

Conclusiones

Los VANT son una excelente alternativa para los estudios topográficos de vasos de almacenamiento, por la alta densidad de puntos y baja resolución espacial de las imágenes levantadas.

La precisión obtenida de 50 mm en planta, es suficiente para vasos de almacenamiento y podría emplearse para el levantamiento de zonas de riego, pero su uso para zonas que requieren mayor precisión con la boquilla de una presa de almacenamiento o áreas donde se proyectarán estructuras donde se requiere más precisión, debe estudiarse con particularidad.

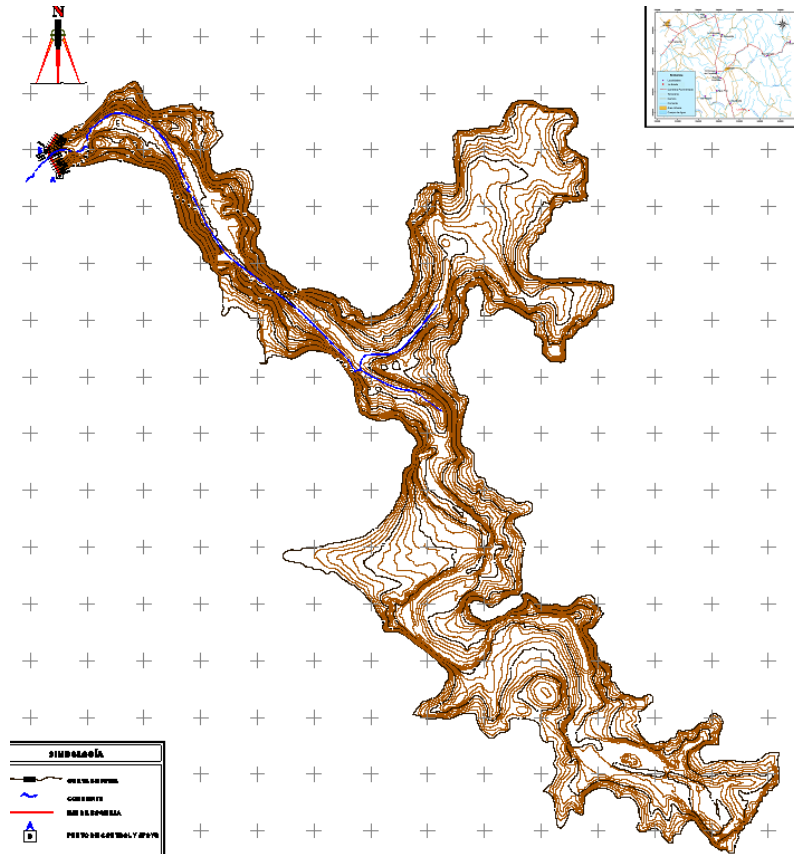


Figura 9. Configuración del vaso de almacenamiento de la Presa La Botella.

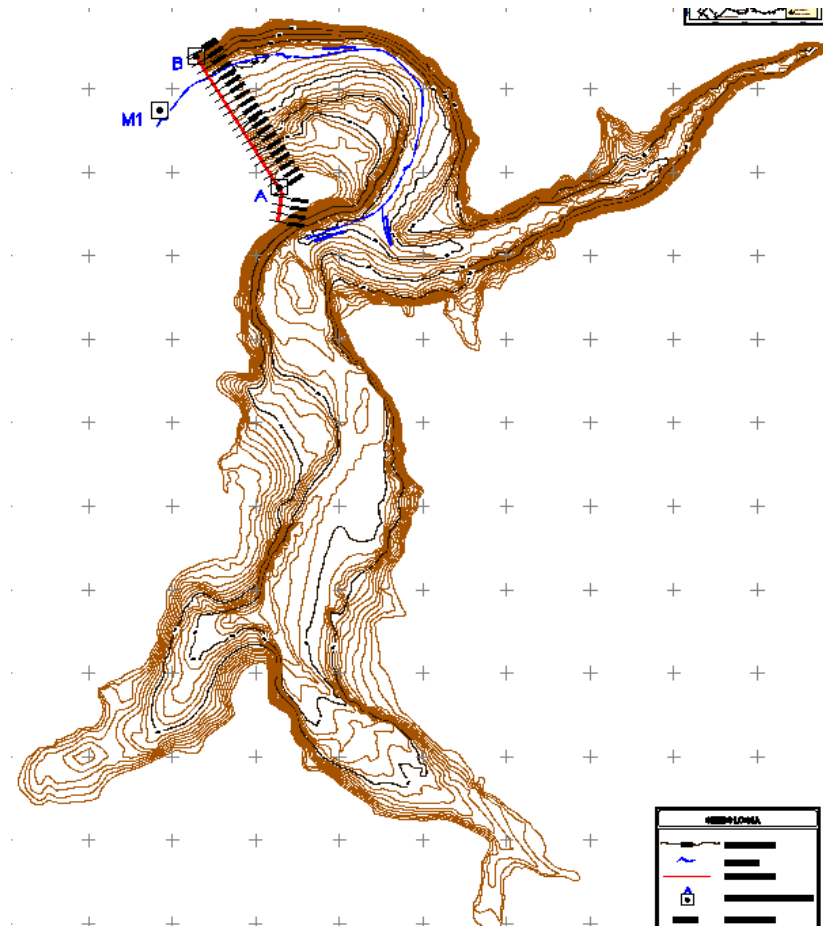


Figura 10. Configuración del vaso de almacenamiento de la Presa La Culebra.

Referencias bibliográficas

- De la Cruz, G. 2012. Estudio de la aviónica de vehículos aéreos no tripulados. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Dietrich, J. T. 2014. Applications of Structure-From-Motion Photogrammetry to Fluvial Geomorphology. University of Oregon Graduate School. Oregon, USA.
- Pérez Escobar, F., & Bonilla, B. J. (2013). Adquisición de Imágenes Aéreas desde un tricóptero. (Ingeniería), Universidad Tecnológica de Pereira, 12 de Noviembre, 2013.
- Fernández Javier, L., Gabriel Gutiérrez A., (2016). Aplicaciones geológicas de los drones., Revista de la Sociedad Geológica de España 29 (1).
- Soler, J. A. 2016. Topografía con Drones, en www.udemy.com/topografia-con-drones-parte-1.