

METODOLOGÍA PARA SEGUIMIENTO DE OBRA DE INFRAESTRUCTURA USANDO DRONE.

Cristian Benjamín García Casierra
Cristian.garcia02@usc.edu.co

Carlos Gustavo Calle Sánchez
Carlos.calle01@usc.edu.co

Javier Fernery Castillo García
Javier.castillo00@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Electrónica

Resumen

El proceso de seguimiento de una obra de infraestructura permite conocer el estado de esta, así como la eficiencia de los trabajadores. El seguimiento es una labor realizada por el interventor, el cual vela para que lo implementado corresponda con lo diseñado en planos, se lleve un cumplimiento en lo presupuestado y además se cumpla con los tiempos establecidos. Este trabajo es realizado haciendo uso de elementos de topografía clásicos, lo que demanda tiempo y dinero, además, de las implicaciones en el tema de seguridad del personal ajeno a la construcción. Para evitar esto, en este proyecto se implementa una metodología capaz de realizar la tarea de seguimiento de una obra civil. Se utiliza un vehículo aéreo no tripulado o dron, los cuales son pequeños aparatos voladores controlados remotamente que, en los últimos años se han convertido en una herramienta extremadamente útil en actividades que el ser humano no puede realizar o que atentan contra su integridad. Para la realización del presente trabajo se usa un dron Quacopter Phantom 3 Standard, encargado de tomar fotografías, estas se cargan en el software Agisoft Metashape Professional, el cual permite hacer procesamiento digital de las imágenes, generando visión 3D, nube de puntos, modelo digital de superficie y medición de distancias. Obteniendo esta información es posible realizar comparativos con el cronograma de la obra y detectar atrasos o adelantos de forma precisa.

Palabras clave: Topografía, vehículo aéreo no tripulado, seguimiento de obra de infraestructura, procesamiento digital de imágenes.

Abstract

The process of monitoring a work of infrastructure allows to know the state of this, as well as the efficiency of the workers. The follow-up is a work carried out by the auditor, which sails so that the implemented corresponds with the design in planes, it takes a fulfillment in the budgeted one and also it complies with the established times. This work is done by using classical topography elements, which demands time and money, in addition, of the implications on the safety issue of non-construction personnel. To avoid this, this project implements a methodology capable of carrying out the task of monitoring a civil work. An unmanned aerial vehicle or drone is used, which are small remotely controlled flying devices that in recent years have become an extremely useful tool in activities that human beings cannot perform or that threaten its integrity. For the realization of this work is used a drone Quacopter Phantom 3 Standard, responsible for taking photographs, these are loaded in the software Agisoft Metashape Professional, which allows digital processing of images, generating 3D vision, cloud of dots, digital surface model and distance measurement. By obtaining this information, it is possible to make a match with the schedule of the work and to detect delays or advances in a precise way.

Key words: topography, unmanned aerial vehicle, infrastructure work monitoring, digital image processing.

1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) son vehículos que pueden permanecer en el aire y viajar a lo largo de rutas específicas de manera automática (David, David, & Ropke, 2019). En un principio estos vehículos fueron concebidos con el propósito de llevar armas, reduciendo el riesgo para los operadores humanos en territorio hostil. Los drones están cambiando la forma en que pensamos y sentimos acerca de nuestro entorno físico gracias a su capacidad para recopilar datos y transportar cargas. Las agencias federales legitimaron por las regulaciones y licencias a los drones, además de que son utilizados por las compañías para realizar estudios, inspecciones e imágenes y su desarrollo tecnológico es impulsado por aquellas comunidades de personas aficionadas a estos vehículos, los cuales gracias a ellos los drones se ven dotados de nuevas cosas cada vez (Rao, Gopi, & Maione, 2016). Desde el 2005 los drones han sido utilizados para vigilar la frontera con México, pero siempre bajo la operación de agencias federales. La Administración Federal de Aviación (FAA), es la entidad que autoriza los permisos para el uso de los drones, pero en el año 2012 se aprobó una nueva ley, la cual obliga a la FAA a crear un sistema de permisos y reglamentos para acelerar el uso de los drones en todo el país (EE.UU) (BBC NEWS, 2012).

En la actualidad existen gran variedad de vehículos aéreos no tripulados. Los cuadricópteros pueden realizar vuelo tanto en interiores como en exteriores, son ampliamente utilizados debido a que tienen una gran maniobrabilidad, un fácil control y capacidad de despegue y aterrizaje vertical. La desventaja que estos tienen es que poseen un alto consumo de energía, en respuesta de esto tenemos un tiempo de operación relativamente corto, por lo general de más o menos de media hora (Maxim, Nhu, Sangho, & Jae-Woo, 2017). Por otro lado, los aviones de ala fija (FW) proporcionan una mayor eficiencia energética para el vuelo de crucero, lo que resulta en una mayor resistencia y/o una mayor capacidad de carga útil, pueden mantenerse en vuelo mucho más tiempo, cubrir áreas más grandes y son capaces de entrar en los espacios aéreos superiores. La elevación no es generada por el movimiento de las alas con respecto al avión, como lo hacen los multicópteros, las alas fijas accionadas se mueven hacia adelante usando las hélices o los motores (Maxim, Nhu, Sangho, & Jae-Woo, 2017).

La aviación ha experimentado un progreso desbordante sobre todo en los sectores civiles. Por ejemplo, en 2015 Airbus y Boeing predijo tasas de crecimiento anual para el tráfico aéreo mundial del 4,6% y del 4,9% en términos de kilómetros de pasajeros en los próximos 20 años, lo que podría dar lugar a 15,2 billones de pasajeros-kilómetros transportados (PKT) en 2034 (Liu, Kreimeier, Stumpf, Zhou, & Liu, 2017). Varias organizaciones e industrias se han creado en torno a los aviones no tripulados, para poder apoyar su integración y diseño con la infraestructura existente. Se han desarrollado aplicaciones centradas en el mercado y plataformas de servicio nuevo y único, y han influido en la percepción social de esta tecnología y sus modelos de negocio asociados.

La topografía es una actividad milenaria, los egipcios medían los límites de un terreno con el fin de delimitar las propiedades y utilizaban cuerdas para calcular los ángulos o la verticalidad de un montículo. Esta actividad es importante al momento de elaborar planos de superficies terrestres, establecer límites en terrenos de propiedad privada y pública. Además, en obras civiles es necesario realizar trabajos topográficos antes, durante y después de las mismas, como carreteras, edificios, puentes, etc (Castro & Vélez, 2017).

Los levantamientos de obra se han visto beneficiados por los avances tecnológicos, actualmente utiliza instrumentos para la medición de distintas variables de un terreno, escáneres 3D y tecnología que utiliza los sistemas GNSS, son algunos ejemplos. El instrumento más usado para tomar mediciones es el teodolito, cuya estructura está compuesta por un sistema de observación y uno de medición. El sistema de observación es un sistema de telescopio mientras que el sistema de medición es escala de dial horizontal y escala de dial vertical (L. Haomiao, 2017).

En los levantamientos de obra de infraestructura con elementos topográficos clásicos, se requiere que el personal esté dentro de la obra para realizar la recolección de datos, este desplazamiento toma tiempo y presenta discontinuidad ya que existen zonas de imposible o difícil acceso, exponiendo posibles accidentes. Estos son un problema importante en la industria de la construcción (Katarzyna & Bartosz, 2017), razón por la cual se debe adquirir seguros laborales. Con el uso de drones para levantamientos de obra, se obtienen datos continuos, precisos, reales y rápidos de toda la superficie en

construcción, sin exposición a accidentes.

Actualmente, existen trabajos sobre levantamientos de obra usando drones, como el realizado por el investigador Juan Guillermo Corredor Daza titulado “Implementación de modelos de elevación obtenidos mediante topografía convencional y topografía con drones para el diseño geométrico de una vía en rehabilitación sector Tuluá - Río frío”. El cual consistió en la implementación de modelos de elevación para el diseño geométrico de 12,62 Km de una vía en rehabilitación en el departamento del Valle del Cauca. Concluyendo que el proceso permite manejar con una mayor facilidad la producción de diseños de una vía ya sea para una rehabilitación, mejoramiento o ampliación.

La metodología presentada en la siguiente investigación es una herramienta destinada a agilizar de manera eficiente y precisa la labor de interventoría. Contribuye a disminuir la presencia de los expertos dentro de la construcción, reduciendo el tiempo en la recolección de los datos y los riesgos de un posible accidente. Además, proporciona modelos digitales de elevación para un análisis más completo, usando como instrumentos base un drone Phantom 3 standard y el software Agisoft Metashape Professional. Para su creación, se debe recolectar información para reconocer las diferencias entre los levantamientos con elementos clásicos y levantamientos usando drones. Con base en esto se diseña una metodología detallada, la cual tiene como objetivo final, realizar la comparación entre los datos recolectados y los datos proporcionados por el interventor, en un tiempo estimado de 7 meses.

1.1 MARCO TEÓRICO.

1.1.1. Levantamiento de obras.

Los levantamientos topográficos pueden contribuir en gran medida a la identificación de características de superficie que no se han visto anteriormente y se pueden usar para producir modelos informáticos tridimensionales del área inspeccionada, que pueden manipularse de varias maneras (O'Driscoll, Landscape applications of photogrammetry using unmanned aerial vehicles, 2018). La topografía es la ciencia que estudia el conjunto de procedimientos para determinar las posiciones de puntos sobre la superficie de la tierra por medio de medidas según los tres elementos del espacio. Estos elementos pueden ser: dos distancias y una elevación, o bien una distancia, una dirección y una elevación (Franquet & Querol, 2010). Este plano resulta esencial para situar correctamente cualquier obra que se desee llevar a cabo, así como para elaborar cualquier proyecto técnico. Si se desea conocer la posición de puntos en el área de interés, es necesario determinar su ubicación mediante tres coordenadas que son latitud, longitud y elevación o cota. Para esta metodología analizaremos dos tipos de levantamiento de obra, levantamientos con elementos clásicos y levantamientos usando drone.

1.1.2. Levantamiento con elementos clásicos

Para realizar levantamiento de obra, es muy necesario e indispensable un mapa topográfico del terreno del proyecto de la obra, hacer un respectivo señalamiento de puntos sobre el terreno, con el fin de realizar mediciones para el cálculo de movimientos del suelo, tener un registro de mediciones para comprobar la situación de tramos de obra ya realizados y determinar los volúmenes de suelo realmente movidos (excavados y/o transportados) y por supuesto tener a la mano el cronograma de la obra.

Los mapas o cartas topográficas son el resultado de una proyección cartográfica, las cuales son transformaciones matemáticas que permiten representar (proyectar) a la esfera en el plano, y convertir las coordenadas geográficas (latitud y longitud) en coordenadas cartesianas (X y Y). Este proceso conlleva distorsiones de la superficie original en tres dimensiones, al convertirse a una superficie plana de dos dimensiones (Serafino, 2018).

Se deberá tener en cuenta la “zona” o distancia desde el meridiano de tangencia al momento de “leer” una carta. Esto debido a la Dilatación Lineal Cartográfica (ecuación 1), la cual es una deformación de la proyección cartográfica manifestada en un cambio gradual de la “escala” a medida que nos alejamos del centro de la faja (Serafino, 2018).

Ecuación 1. Ecuación de la dilatación cartográfica. Fuente: (Serafino, 2018).

$$m = \frac{1 + Y^2}{2N^2(1 + \eta^2) + \dots}$$

- Donde:**
- “Y” es la distancia desde el meridiano central de la faja.
 - “N” es el radio de curvatura algo mayor que el radio terrestre “R”.
 - $\eta = e' \cos \theta$ es pequeño y para distancias cortas se puede despreciar, como así también los siguientes términos de orden superior por la misma razón.

1.1.3 Levantamiento con dron.

Para realizar levantamiento con drones se hace uso de una técnica (o colección de técnicas) llama fotogrametría la cual se encarga de determinar las propiedades geométricas y espaciales de los objetos en una zona determinada, a partir de imágenes aéreas. El objetivo principal es convertir datos bidimensionales en información cartográfica. Para obtener una fiel reconstrucción de los datos, los objetos en la zona de reconstrucción deben aparecer en un número suficiente de imágenes, esa información es la que permite extraer de manera clara su estructura. Para obtener ese extra de información se realiza un solapamiento entre imágenes consecutivas (overlap), para esto el piloto del UAV debe planificar ruta o misión de manera que en cada imagen este un elemento, que también aparece en la imagen anterior, posterior y en las venideras (Aerial Insights, 2018).

Zona de correlación.

El vuelo de una aeronave tripulada remotamente (Drone) se realiza a una altitud que debe calcularse teniendo en cuenta la escala deseada y la distancia focal de la cámara, pero además se debe tener en cuenta el parámetro de “correlación” el cual indica que se debe cubrir con imágenes un cierto territorio y es preciso que cada foto tenga una zona en común con la fotografía tomada anteriormente, para cumplir con esto el RPAS debe contar con una altura absoluta de vuelo y una velocidad constante, esto con el fin de realizar disparos con intervalos regulares que correspondan a recorridos iguales y de esta manera garantizar un porcentaje de correlación entre la sucesión de imágenes (Granados, 2018). Para obtener unos excelentes resultados hay que garantizar que el recubrimiento longitudinal sea mayor del 80% y el recubrimiento transversal mayor al 60%.

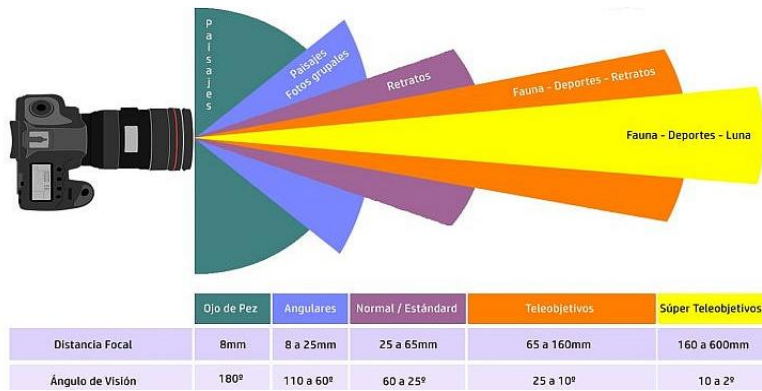
Distancia Focal.

La distancia focal es la descripción básica de un lente fotográfico. No es una medida de la distancia real de un lente, sino que “es un cálculo de la distancia óptica desde el punto en donde los rayos convergen hasta formar una imagen nítida de un objeto para el sensor digital del plano focal de la cámara” (Nikon Inc., 2017). En la figura 1 se puede observar un ejemplo de distancia focal corta y distancia focal larga, en la primera al sacar la fotografía se obtiene una foto de todo el paisaje, mientras que con la segunda opción se obtendrá exclusivamente lo que se quiere capturar. En la figura 2 se observa la relación entre la distancia focal y el ángulo de visión, este último determina el trozo de escena que va a salir en la fotografía. Cada objetivo, según su distancia focal, recogerá más o menos ángulo de visión. (Silvia, 2016).

Figura 1. Diferencia de enfoque en una fotografía con respecto a la distancia focal. Fuente: (Silvia, 2016)



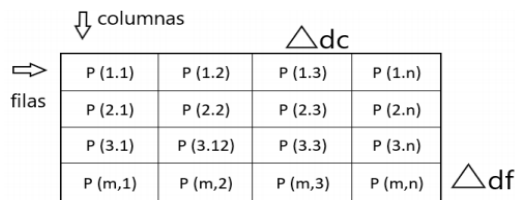
Figura 2. Relación entre distancia focal y Angulo de visión. Fuente: (Silvia, 2016)



Píxel

Es la unidad más pequeña de los elementos pictóricos que constituyen una imagen digital, siendo una proyección del espectro de colores. Por lo general, se cree que los píxeles de color tienen componentes rojos, verdes y azules (S.Sugathan & A.P.James, 2014). De una matriz de píxeles (figura 3) que se reparten en filas y columnas se obtiene como resultado una imagen digital, la suma de todos los píxeles repartidos en las filas y columnas es su tamaño en píxeles. Entre mayor sea el número de píxeles que contenga una imagen mayor será su resolución.

Figura 3. Matriz de píxeles imagen digital. Fuente: Adaptado de: (Granados, 2018).



GSD

La Distancia de muestreo en tierra (GSD) es la distancia entre dos centros de píxeles consecutivos medidos en el suelo. Cuanto mayor sea el valor de la imagen GSD, menor será la resolución espacial de la imagen y los detalles menos visibles. El GSD está relacionado con la altura del vuelo: cuanto mayor sea la altitud del vuelo, mayor será el valor GSD. Un GSD de 5 cm significa que un píxel en la imagen representa linealmente 5 cm en el suelo ($5 * 5 = 25$ centímetros cuadrados) y un GSD de 10 m significa que un píxel en la imagen representa linealmente 10 m en el suelo ($10 * 10 = 100$ metros cuadrados) (Pix4D, 2015).

Incluso cuando se vuela a una altura constante, las imágenes de un proyecto pueden no tener el mismo GSD. Esto se debe a las diferencias de elevación del terreno y los cambios en el ángulo de la cámara mientras se disparan. Dado que el ortomosaico se crea utilizando la nube de puntos 3D y las posiciones de la cámara, se calculará y utilizará un GSD promedio.

Escala

En la fotogrametría y en los vuelos con Drone la escala es un parámetro de gran importancia, este es un dato que en muchos de los casos se conoce antes de realizar el vuelo, pero también puede ser conocido después de haberlo realizado. Se requiere hallar la altura adecuada en la que el Drone deba tomar las fotografías, cuando se conoce la escala a la que se requiere el trabajo, en caso de que, si se conozca la altura, pero no la escala entonces deberemos hallarla por medio de un cálculo entre la distancia focal y la altura de vuelo (más adelante se detallara como calcular las alturas de vuelo).

Por medio de los conceptos de fotogrametría es posible calcular un diseño geométrico de un vuelo, en donde podemos definir parámetros como: determinación de las líneas de vuelo, determinación de la separación entre líneas de vuelo, determinación de la altura de vuelo sobre el terreno, determinación de la altura absoluta de vuelo, entre otras (Granados, 2018).

1.1.4. Procesamiento Digital de las imágenes.

El procesamiento digital de imágenes puede extraer información útil de las imágenes y construir modelos digitales de las mismas (Chen & Liu, 2009). Los costos cada vez más bajos de los equipos de cómputo, el aumento de equipos para la digitalización de imágenes que se encuentra disponible en el mercado, además de las nuevas tecnologías que tienden a prometer grandes avances para el procesamiento de imágenes son factores que se combinan para indicar la tendencia futura del procesamiento digital de imágenes.

El procesamiento de imágenes tiene como objetivo mejorar el aspecto de las imágenes y hacer más evidentes en ellas ciertos detalles que se desean hacer notar. La imagen puede haber sido generada de muchas maneras, por ejemplo, fotográficamente, electrónicamente, o por medio de monitores de televisión. El procesamiento de las imágenes se puede, en general hacer por medio de métodos ópticos, o bien por medio de métodos digitales, en una computadora (Malacara, 2007).

1.1.5. Fotogrametría.

La fotogrametría es el proceso de generar un modelo 3D a partir de imágenes 2D; El modelo resultante se puede escalar y usar para medir distancias entre objetos (Rebecca & Branko, 2019). Desde los principios de los años ochenta la fotogrametría terrestre fue utilizada por los arqueólogos, pero el alto costo del hardware y equipos de procesamiento, fue el causante de que esta no fuera una técnica viable para la mayoría de los proyectos (O'Driscoll, 2018). En la década del 2000 gracias a la llegada de las cámaras digitales de bajo costo y una mejora en el procesamiento de las computadoras, la técnica de fotogrametría se convirtió en una opción más viable para el análisis y la evaluación de sitios a pequeña escala. Con el rápido desarrollo de los drone's en los último años, los arquitectos y arqueólogos se vieron bastante beneficiado, ya que hacer fotogrametría se convirtió en una tarea más sencilla (O'Driscoll, 2018).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La obra de infraestructura que se analizará se encuentra ubicada en el departamento del Valle del Cauca en la ciudad de Santiago de Cali y corresponde al bloque de posgrados de la Universidad Santiago de Cali. En la figura 4 se muestra su localización general.

Figura 4. Localización general de la construcción civil. Fuente: José Eduardo Fuentes Delgado-Javier Ferney Castillo.



La sección 3 está dedicada a la exposición de las herramientas usadas para la creación de la metodología, estas se presentan en las siguientes subsecciones.

2.1. Drone.

Se usó un drone Phantom 3 standard para la captura de fotos de la obra de infraestructura, este vehículo fue presentado en el año 2015 por la compañía china DJI.

Phantom 3 standard pesa 1216 g, tiene una cámara de 12,4 MP y longitud focal de 20 mm, funciona con los sistemas de navegación GLONASS y GPS, y su velocidad máxima horizontal es de hasta 16 m/s. Cuenta con una batería LiPo 4S de 15,2 V con 4480 mAh.

2.2. Agisoft Metashape Professional.

Es un producto de software independiente que realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales 3D para su uso en aplicaciones GIS, documentación de patrimonio cultural y producción de efectos visuales, así como para mediciones indirectas de objetos de diversas escalas.

La técnica de fotogrametría digital implementada de manera inteligente, aplicada con métodos de visión por ordenador, da como resultado un sistema de procesamiento automatizado inteligente que puede ser administrado por un recién llegado en el campo de la fotogrametría y por un especialista que puede ajustar el flujo de trabajo a numerosas tareas específicas y diferentes tipos de datos. A lo largo de varios estudios de casos, Metashape demuestra producir resultados precisos y de calidad (Agisoft, 2019).

2.3. Frecuencia de vuelo.

El número de vuelos que se realizarán, en un tiempo determinado, es dependiente de 3 factores:

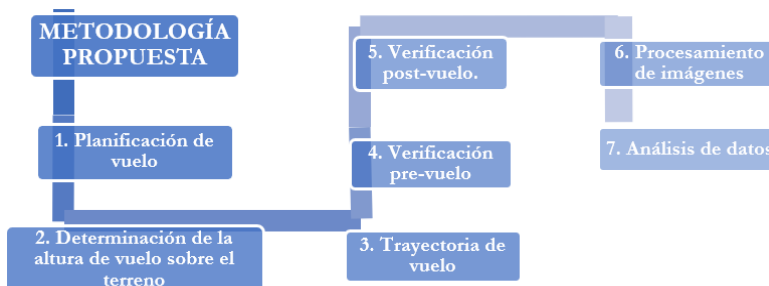
- Fechas de actividades importantes en el cronograma.
- Condiciones climáticas.
- Disponibilidad del piloto.

Para la metodología propuesta se aplicó un mínimo de 2 vuelos mensuales, este número aumenta si en alguna etapa de la obra se presenta mayor número de actividades por realizar, las cuales exijan un seguimiento continuo de avance.

2.4. Metodología propuesta

La metodología propuesta se basa en una serie de procesos los cuales se deben llevar a cabo de manera ordenada para efectuarla de manera segura y eficiente, cumpliendo así con el objetivo planteado. En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo del proceso. Este paso a paso se detalla en las siguientes subsecciones.

Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia.

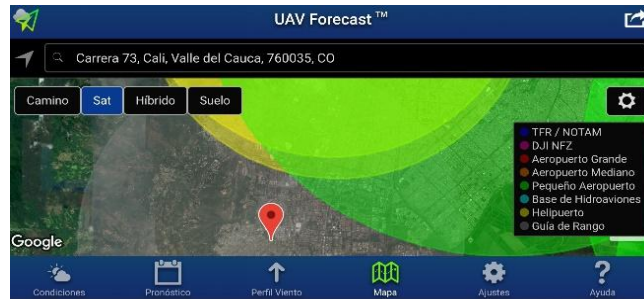


2.4.1. Planificación del vuelo.

Es importante conocer el lugar en el cual se llevará a cabo el vuelo. La orografía, rama de estudio de la geografía física que se encarga de estudiar y describir el relieve de una región en concreto, obliga a valorar las oportunidades y riesgos, dependiendo de esta se definirá la forma de realizar el trabajo. Para ello se comenzará a trabajar con un mapa cartográfico a pequeña escala y un reconocimiento real del terreno.

Se debe averiguar si es legal volar en la zona elegida. Por medio de los mapas OACI se concreta si es espacio aéreo controlado, restringido, de prohibición de vuelo fotográfico, etc. Usando la aplicación UAV Forecast también se puede obtener esa información. En la figura 6 se muestra la libertad de vuelo en la zona y las restricciones existentes cerca de esta.

Figura 6. Estado aéreo de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.



Ahora, se define un punto de despegue y aterrizaje, es necesario que este sea un lugar relativamente plano, alejado del paso frecuente de personas y sin obstáculos a su alrededor, ya que al presentarse alguna falla se tiene que ejecutar una maniobra RTH (Regreso al punto de origen) y es probable que el aterrizaje del aparato no sea en el punto preciso.

2.4.2. Determinación de la altura de vuelo sobre el terreno.

Se exploran los principales obstáculos naturales y artificiales que se encuentran en la ruta de ida y vuelta, es importante conocer las alturas de estos ya que el dron utilizado no cuenta con sensores que eviten colisiones.

En este caso, la estructura con mayor altura es la grúa de la misma obra civil, esta alcanza los 35m. Por lo tanto, se define una altura de vuelo segura de 75 metros.

Esta altura también se puede encontrar si se requiere que las fotografías cuenten con una escala específica conocida, usando la ecuación 2.

Ecuación 2. Ecuación para calcular la altura media de vuelo. Fuente: (Zapata, 2003)

$$Zm = c \times Em$$

Donde,

- **Zm** = Altura media de vuelo.
- **c** = Longitud focal.
- **Em** = escala de la imagen.

Escala: La escala de una fotografía está definida por la ecuación 3:

Ecuación 3. Ecuación para calcular la escala de una fotografía. Fuente: (Zapata, 2003)

$$E = \frac{ab}{AB} = \frac{f}{H}$$

Donde,

- **f** = Longitud focal.
- **H** = Altura de vuelo sobre el terreno.
- **ab** = Distancia sobre el fotograma.
- **AB** = Distancia sobre el terreno.

Por lo tanto, para el caso presentado la escala de la fotografía es:

- **Longitud focal:** 20 mm
- **Altura de vuelo sobre el terreno:** 75m

$$E = \frac{ab}{AB} = \frac{0.02m}{75m}; \text{ donde } E = \frac{1}{3750,93}$$

GSD: La distancia de la muestra del terreno se calcula con la ecuación 4:

Ecuación 4. Ecuación para calcular GSD. Fuente: (Zapata, 2003)

$$GSD = \frac{\text{Altura de Vuelo} \times \text{Ancho del sensor}}{\text{Longitud focal} \times \text{Ancho de la imagen}}$$

Para el DJI Phantom 3 Standard las especificaciones son:

- **Ancho de la imagen:** 4000 px
- **Ancho del sensor:** 6.17 mm
- **Longitud focal:** 20 mm
- **Altura de vuelo:** 75 m

Estos datos se evalúan en la ecuación 4.

$$GSD = \frac{7500\text{cm} \times 0.617\text{cm}}{2\text{cm} \times 4000\text{px}}; \text{ donde } GSD = 0,578\text{cm/px}$$

2.4.3. Trayectoria de vuelo.

Se planifica la ruta que se requiere realizar, utilizando el modo de vuelo Waypoint, el cual consiste en la grabación de una serie de puntos geolocalizados los cuales la aeronave podrá recorrer de forma autónoma, liberando al piloto del control de esta y permitiendo centrar sus capacidades en otros aspectos como el nivel de batería, estado de conexión remota y altitud, número de fotos tomadas. Este paso se lleva a cabo usando la aplicación móvil DroneDeploy, la cual permite de forma sencilla especificar los siguientes detalles:

- **Nombre del proyecto:** Construcción edificio de posgrados.
- **Altura de vuelo:** 75m
- **Zona de correlación (Front overlap):** 75%
- **Zona de correlación (Side overlap):** 65%
- **Dirección de vuelo:** 6°
- **Velocidad de vuelo (mapeo):** 15m/s
- **Punto de partida:** 1

Al proporcionar estos datos, automáticamente se muestra un cálculo de tiempo de vuelo, área por recorrer, número de fotos que se tomarán y cuantas baterías serán necesarias.

Antes de realizar el vuelo se deben tener en cuenta varios aspectos como lo son: El rango de hora (10:00 am – 3:00 pm), se recomienda realizarlo a las 12:00 m debido a que la posición del sol evita exceso de sombras, estar dentro del rango de temperatura de funcionamiento del dron (0° a 40° C) y sin superar el techo de servicio máximo sobre el nivel del mar (6000m), contar con nivel óptimo de carga en las baterías (Dron, control remoto y teléfono móvil), concretar conexión con suficientes satélites, asegurar que no se registre interferencia entre la conexión Dron-Control, no se recomienda que el dron se eleve si la velocidad del viento es de 8-10 m/s o más. Además, evitar proceder si las condiciones climáticas no son las adecuadas (Lluvia, tormenta eléctrica, niebla), se recomienda usar la aplicación móvil UAV Forecast proporciona datos de medición de clima, temperatura, velocidad del viento y su dirección, probabilidad de precipitación, porcentaje de cubrimiento de nubes, distancia de visibilidad, satélites disponibles y el nivel de kp. Este último mide la disrupción geomagnética causada por la actividad solar, siendo 0 el nivel mínimo, 9 el máximo y 3 o 4 seguro para volar. Si este índice es alto, se genera imprecisión en el sistema de posicionamiento global y disminución o fluctuación en el número de satélites bloqueados.

2.4.4. Verificación pre-vuelo.

Antes de iniciar el vuelo se debe tener en cuenta una lista de comprobación para certificar que las variables iniciales garanticen un vuelo seguro. Este proceso se facilita usando la aplicación móvil DJI, la cual proporciona las siguientes herramientas:

- **Lista de empaque:** Se inicia haciendo revisión de actualización de la aplicación, mapas descargados, batería de teléfono celular y radiocontrol cargadas, tarjeta SD con espacio suficiente, estado de las hélices, paños para lentes y licencia de piloto UAV.
- **Lista de revuelo:** Se procede a inspeccionar el dron en busca de defectos, batería ubicada correctamente y con carga suficiente, hélices ajustadas, retirar el protector de la cámara, tarjeta SD en posición, brillo del monitor al máximo y antenas en posición.
- **Verificación de despegue:** Se debe hacer revisión de presencia de otros drones en la zona, avisar a los espectadores que se va a despegar, buscar/escuchar defectos en el dron, monitorear la energía de la batería y la potencia de la señal.

2.4.5. Verificación post vuelo.

Al realizar el aterrizaje, se debe apagar el dron, ubicar el protector de la cámara, guardar las baterías o recargarlas, retirar el teléfono celular, apagar y guardar el radio control, retirar, limpiar y guardar las hélices, desconectar cables, descargar en el computador las fotografías tomadas y, por último limpiar el dron y guardarlo. Para posteriormente iniciar con el tratamiento de las fotografías tomadas.

2.4.6. Procesamiento de imágenes.

Se usó el software Agisoft Metashape Professional para cumplir con el procesamiento de las imágenes tomadas. En primera instancia, estas se alinean, proceso el cual consiste en unir los puntos georreferenciados de cada fotografía, el resultado es dependiente de los porcentajes de correlación usados en el vuelo. Ahora, se crea la “Nube de puntos densa”, la cual es un conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional. Estos vértices se identifican como coordenadas X, Y, y Z y representan la superficie externa de un objeto. En este momento es posible realizar la “Malla”, esta es la base para generar una textura, la cual se crea completamente en el siguiente proceso llamado “Textura”, ahora ya se obtiene el modelo tridimensional. Si se requiere que éste presente una textura detallada, se aplica el proceso llamado “Tiled model”, el cual se crea a partir de la nube de puntos densa. Este modelo 3D es útil para observar estructuras las cuales no se detallan con precisión en una simple fotografía. Por último, se genera el “Modelo digital de elevación” y la “Ortofoto”, el primero proporciona información acerca de las diferentes alturas presentadas en el terreno, siendo un instrumento importante para valorar la evolución vertical de la obra. Mientras que la segunda herramienta, es el emparejamiento de todas las fotografías representadas en una nueva imagen compuesta. Debido a que estos mapas son una representación precisa de la tierra, es posible usarlos para medir distancias reales.

2.4.7. Análisis de datos.

Al iniciar la labor del seguimiento de la obra señalada, fue proporcionado, por parte de los encargados, el cronograma denominado “Construcción superestructura mixta” del Edificio de Posgrados, el cual iniciaba el día 15 de agosto de 2018 y finalizaba el día 8 de julio de 2019, teniendo una duración de 266 días. Con base a éste, se inició el análisis y la comparación con los modelos generados en el software. Este proceso consiste en tomar cada ítem y concretar si se encuentra construido dentro de las fechas definidas, para luego escribir un informe con los resultados.

Por último, se realizó la comparación entre los informes de seguimiento aéreo y los proporcionados por el interventor de la obra, con el fin de determinar si la metodología planteada es más eficiente que la utilizada de forma tradicional.

3. RESULTADOS.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con la metodología aplicada. En la figura 7 se muestra una comparación entre el día inicial de seguimiento aéreo a la obra (2 de agosto de 2018) y el último día (24 de mayo de 2019). Sumando un total de 8 meses, excluyendo diciembre de 2018 y enero de 2019.

Figura 7. Fotografías del día inicial y final de seguimiento aéreo. Fuente: José Eduardo Fuentes. Javier Ferney Castillo.



En la tabla 1 se listan las actividades correspondientes a los procesos de desarrollo de la obra.

Tabla 1. Descripción de las actividades. Fuente: Elaboración propia.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
1	Columnas-pantallas en concreto NIVEL +1,50 a NIVEL +6,00. LADO SUR.
2	Columnas-Pantallas en concreto NIVEL +1,50 a NIVEL +6,00. LADO NORTE
3	Vigas y losa de entrepiso maciza NIVEL +6,00. LADO SUR - Estructura metálica losa y aulas NIVEL +6,00. LADO SUR
4	Columnas-Pantallas en concreto NIVEL +6,00 a NIVEL +9,70. LADO SUR.
5	Vigas y Losa de entrepiso maciza NIVEL +9,70. LADO SUR. - Estructura metálica losa y aulas NIVEL +9,70. LADO SUR.
6	Vigas y losa de entrepiso maciza NIVEL +6,00 LADO NORTE - Estructura metálica losa y aulas NIVEL +6,00 LADO NORTE - Circulaciones y puentes NIVEL +6.00.
7	Columnas-Pantallas en concreto NIVEL +6,00 a NIVEL +9,70 LADO NORTE - Estructura metálica losa y aulas NIVEL +9,70 LADO NORTE
8	Lado Sur etapa 1: Vigas ejes 4, 5, 6 y 7.
9	Lado Sur etapa 1: Perfiles IP, estructura metálica aula, Conectores aulas ejes 7-6, 6-5, y 5-4.
10	Lado Sur etapa 1: Fundida losa aulas ejes 7-6, 6-5, 5-4.
11	Lado Sur etapa 1: Pantallas MP-1 nivel + 8.30 a +11.20
12	Lado Sur etapa 1: Pantallas CP-1 nivel +9.70 a +11.20
13	Lado Sur etapa 2: Vigas ejes 2, 3 y 8
14	Lado Sur etapa 2: Perfiles IP, Lámina colaborante aula, Conectores aulas ejes 8-7, 4-3, y 3-2
15	Lado Sur etapa 2: Fundida losa aulas ejes 7-6, 6-5, 5-4
16	Lado Sur etapa 2: Pantallas MP-1 nivel + 8.30 a +11.20
17	Lado Sur etapa 2: Pantallas CP-1 nivel +9.70 a +12.60
18	Etapla 3: Puentes y circulaciones
19	Lado Norte etapa 1: Vigas ejes 7, 6, 5 y 4
20	Lado Norte etapa 1: Perfiles IP, Lámina colaborante aula, Conectores aulas ejes 8-7, 4-3, y 3-2
21	Lado Norte etapa 1: Fundida losa aulas ejes 7-6, 6-5, 5-4
22	Lado Norte etapa 1: Pantallas MP-1 nivel + 8.30 a +11.20
23	Lado Norte etapa 1: Pantallas CP-1 nivel +9.70 a +12.60

El análisis de los modelos procesados y su comparación con los cronogramas de la obra se presentan en la tabla 2. Además se exhiben observaciones del estado en el que se encuentra cada actividad con su respectiva fecha.

Tabla 2. Resultados obtenidos. Fuente: Elaboración propia.

ACTIVIDAD	CRONOGRAMA		OBSERVACIONES
	FECHA INICIO	FECHA FINAL	
1	15/08/18	8/09/18	En el modelo elaborado con las fotografías del vuelo fotogramétrico del 19 de septiembre de 2018, se observa que han sido construidas 12 de las 14 pantallas en concreto.
2	25/09/18	19/10/18	El 28 de septiembre de 2018 se está terminando de ubicar la estructura metálica del nivel +1.50m. Entre el 9 de octubre y el 18 del mismo mes, se construyó lo establecido en este tema.

3	10/09/18	3/10/18	El 19 de septiembre aún no se había iniciado la construcción. Esta inició el 9 de octubre de 2018 y finalizó entre el 12 de marzo y el 21 de marzo de 2019.
4	4/10/18	29/10/18	El 9 de octubre aún no se había iniciado la construcción. Según el registro fotogramétrico del 22 de febrero del 2019, este tema se encuentra finalizado.
5	30/10/18	24/11/18	El 21 de marzo de 2019 se observó inicio de la elaboración de las vigas. El 25 de abril se está haciendo el montaje de la estructura metálica y el día 3 de mayo se inicia con la fundición de la losa de entrepiso.
6	20/10/18	15/11/18	El 23 de octubre de 2018, se inició con la construcción de las columnas-pantallas de +1.50m a +6.00m. El día 16 de noviembre de 2018, es decir un día después que se debía finalizar los temas 1, 2 y 3, se observan culminadas las columnas-pantallas. Entre el 22 de febrero y el 28 de marzo de 2019 se finalizaron los temas 1 y 2, el tema 3 es finalizado el 25 de abril del 2019, en estos temas la obra tuvo un atraso aproximado de 3 meses.
7	16/11/18	11/12/18	El 16 de noviembre de 2018, pese a que es el mismo día en que se debe empezar este tema, la obra presenta un atraso, debido a que ese día recién estaban terminando las pantallas de nivel +1.50m. Este tema fue finalizado entre el 28 de marzo y el 3 de abril de 2019.
8	26/03/19	10/04/19	Este tema en general incluye todo el proceso de construcción de las vigas en los ejes 4, 5, 6 y 7, se concluye que la construcción de estas fue realizada en el tiempo establecido.
9	10/04/19	23/04/19	El 25 de abril de 2019, la obra presenta un atraso debido a que solo está terminada la estructura metálica de los ejes 4-5 y 5-6, y la de los ejes 7-6 fueron implementadas entre el 25 y 28 de abril.
10	17/04/19	25/04/19	El 25 de abril (mismo día en que este tema debió haber sido finalizado), se está ubicando la estructura metálica, generando atraso en este tema. La fundición de las losas de las aulas empieza entre el 28 de abril y el 3 de mayo de 2019.
11	10/04/19	25/04/19	Tema realizado en el tiempo establecido en el cronograma.
12	15/04/19	29/04/19	Tema realizado en el tiempo establecido en el cronograma.
13	29/03/19	15/04/19	Este tema en general incluye todo el proceso de construcción de las vigas en los ejes 2, 3 y 8, del análisis fotogramétrico, se concluye que la construcción de estas fue realizada en el tiempo establecido.
14	15/04/19	27/04/19	El 3 de mayo de 2019, la obra presenta un atraso debido a que solo está terminada la estructura metálica de los ejes 3-4.
15	24/04/19	29/04/19	El 3 de mayo se está fundiendo la losa del aula que compone los ejes 8-7, esta debió haber estado fundida 4 días atrás.
16	15/04/19	27/04/19	Tema realizado en el tiempo establecido en el cronograma.
17	27/04/19	07/05/19	Tema realizado en el tiempo establecido en el cronograma.
18	27/04/19	09/05/19	El 3 de mayo de 2019, se puede observar que se están terminando la circulación del lado sur, que componen los ejes 8, 7, 6, 5 y 4, lo que genera que la obra tenga un atraso.
19	03/04/19	09/04/19	Este tema incluye todo el proceso de construcción de las vigas en los ejes 7, 6, 5 y 4, la elaboración de las vigas se inició el 3 de mayo del 2019.
20	09/04/19	23/04/19	El 3 de mayo de 2019, sólo se han ubicado los perfiles de los ejes 5-6.
21	16/04/19	23/04/19	Realizando el análisis fotogramétrico, se observa que la obra presenta atraso en este tema.
22	09/04/19	24/04/19	Tema realizado en el tiempo establecido en el cronograma.
23	13/04/19	29/04/19	Tema realizado en el tiempo establecido en el cronograma.

4. DISCUSIÓN

Es posible crear una metodología que use los vehículos aéreos no tripulados para seguimiento de obras de infraestructura donde se evidencie su eficacia y seguridad, evaluando la evolución de esta.

Se concuerda con el investigador Juan Guillermo Corredor Daza, quien en su trabajo titulado “Implementación de modelos de elevación obtenidos mediante topografía convencional y topografía con drones para el diseño geométrico de una vía en rehabilitación sector Tuluá - Río frío” concluye que “Los levantamientos topográficos realizados con drones economizan mucho tiempo en recolección de información y sus resultados presentan muy buenas precisiones que pueden ser utilizados en muchos proyectos de consultoría”.

Para investigaciones futuras se recomienda utilizar la herramienta de medición de volumen proporcionada por algunos softwares, la cual permite conocer variables como la cantidad de tierra extraída, la cuantía de material utilizado, entre

otros.

5. CONCLUSIONES

Se aborda el tema de seguimiento de obra de infraestructura empleando fotogrametría aérea. El uso del dron se convierte en una herramienta activa en la tarea de seguimiento evolutivo de obra, ya que, con un sobrevuelo combinado con un software de procesamiento de imágenes, se puede evaluar la totalidad del área de construcción estructural., esto reduce el desplazamiento de personal dentro de la misma y la toma de fotografías específicas por cada actividad de obra.

Tal como se observa en la tabla 1, la obra presenta algunos retrasos, estos se pueden observar en los registros fotográficos obtenidos en la metodología propuesta. Además, en esta se puede realizar un contraste entre lo construido (registro fotogramétrico aéreo) y lo establecido en el cronograma

Debido a esos retrasos en la fase 1 de la obra (Subterráneo), el contratista reprogramó tiempos y presentó un nuevo cronograma de las mismas etapas expuestas inicialmente (Construcción superestructura mixta), el replanteo iniciaba el 18 de marzo de 2019 y finalizaba el día 15 de julio de 2019. Esto generó que parte de los datos obtenidos en el seguimiento aéreo, no presentaran construcción de los ítems. Además, las nuevas fechas sobrepasaron el rango de tiempo estimado de seguimiento (8 meses). El clima es un contra para la metodología presentada, pero también lo es para el avance de construcción, así que no se ve afectado el proceso de seguimiento.

Algunas de las causas por las cuales se presentaron retrasos fueron:

- Horario de uso de la torre grúa restringido, debido a los ruidos generados por esta y su cercanía a zona residencial. Resolución puesta por el DAGMA.
- Las lluvias, el nivel freático y agua externa que drenó sobre la excavación, provocaron inundaciones. En la figura 7 se evidencia esta causa.

Figura 8. Fotografías que evidencian inundaciones. Fuente: Gabriel Saldarriaga.



De acuerdo con los resultados obtenidos y las comparaciones realizadas con los informes de interventoría de la obra, se deduce que la metodología creada es eficiente, segura, rápida y precisa, facilitando la elaboración de informes y demás actividades de interventoría.

6. REFERENCIAS

- Aerial Insights. (Enero de 2018). *Aerial Insights*. Obtenido de ¿Qué es la fotogrametría con drones?: <https://www.aerial-insights.co/blog/fotogrametria-con-drones/>
- Agisoft. (2019). *Acerva de Metashape*. Obtenido de Agisoft: <https://www.agisoft.com/>
- BBC NEWS. (19 de Septiembre de 2012). *BBC NEWS*. Obtenido de Los drones "invaden" Estados Unidos: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2012/09/120917_aviones_no_tripulados_ao
- Castro, J., & Vélez, M. (2017). La importancia de la topografía en las ingenierías y arquitectura. *Polo del Conocimiento*, 2(7), 1071-1081.
- Chen, Y., & Liu, H. (2009). *Study on the meso-structure image of shale based on the digital image processing technique*. doi:10.1109/IASP.2009.5054656

- David, S., David, P., & Ropke, S. (2019). An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 102, 289-315. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.018>.
- Franquet, J., & Querol, A. (2010). *Nivelación de terrenos por regresión tridimensional* (Vol. 1). Tortosa: UNED-Tortosa. C/ Cervantes, n°: 17, 43.500 TORTOSA.
- Granados, Z. (2018). *Manual para el postproceso de imágenes obtenidas a partir de una aeronave tripulada remotamente (drone) en los software agisoft photoscan y pix4d*. Universidad Distrital Francisco Jose de Cladas, Bogotá D.C. Obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/14055/2/ZafraGranadosYesidRomairoAnexo-1.pdf>
- Katarzyna, M., & Bartosz, M. (2017). Methodology of improving occupational safety in the construction industry on the basis of the TWI program. *Safety Science*, 92, 225-231. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.10.017>
- L. Haomiao, W. W. (Dec de 2017). Research on theodolite auto-collimation technique based on visual image analysis. *2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 150-153. doi:10.1109/ITNEC.2017.8284927
- Liu, Y., Kreimeier, M., Stumpf, E., Zhou, Y., & Liu, H. (2017). Overview of recent endeavors on personal aerial vehicles: A focus on the US and Europe led research activities. *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 53-66. doi:<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.03.001>
- Malacara, D. (2007). *Óptica tradicional y moderna* (Vol. 3). Fondo de Cultura Económica.
- Maxim, T., Nhu, V. N., Sangho, K., & Jae-Woo, L. (2017). Comprehensive preliminary sizing/resizing method for a fixed wing – VTOL electric UAV. *Aerospace Science and Technology*, 71, 30-41. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.09.008>
- Nikon Inc. (2017). *Entendiendo la Distancia Focal*. Obtenido de Nikon: <https://www.nikon.com.mx/learn-and-explore/a/tips-and-techniques/entendiendo-la-distancia-focal.html>
- O'Driscoll, J. (2018). Landscape applications of photogrammetry using unmanned aerial vehicles. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 22, 32-44. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.09.010>.
- Pix4D. (2015). *Distancia de muestreo en tierra (GSD)*. Obtenido de Pix4D Support: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD->
- Rao, B., Gopi, A., & Maione, R. (2016). The societal impact of commercial drones. *Technology in Societ*, 45, 83-90. doi:<https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2016.02.009>
- Rebecca, N., & Branko, G. (2019). Methodology for diagnosing crack patterns in masonry structures using photogrammetry and distinct element modeling. *Engineering Structures*, 181, 519-528. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.036>.
- S.Sugathan, & A.P.James. (2014). *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*. doi:10.1109/ICACCI.2014.6968476
- Serafino, L. (2018). *Levantamientos Especiales para Obras*. Universidad Nacional de San Juan, San Juan.
- Silvia, I. (2016). *La Distancia Focal Explicada con Ejemplos*. Obtenido de Dzoom: <https://www.dzoom.org.es/la-distancia-focal-todo-lo-que-necesitas-saber-explicado-con-ejemplos/>
- Zapata, O. (2003). *FUNDAMENTOS DE FOTOGRAMETRÍA*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de minas, Medellín.